

RIVM Rapport 610790001/2007

Hoogspanningslijnen en fijn stof

Een literatuuronderzoek

G Kelfkens, LSO
MJM Pruppers, LSO

Contact:
Gert Kelfkens
RIVM/LSO
gert.kelfkens@rivm.nl

Dit onderzoek werd verricht in opdracht van het ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieu, Directoraat Generaal Milieu, Directie Stoffen, Afvalstoffen en Straling, Afdeling Straling, Nucleaire en Bioveiligheid, in het kader van project BEST, onderdeel 'Ondersteuning EMV-beleid'.

© RIVM 2007

Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: 'Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), de titel van de publicatie en het jaar van uitgave'.

Rapport in het kort

Hoogspanningslijnen en fijn stof

Een literatuuronderzoek

Voor zover nu bekend beïnvloeden bovengrondse hoogspanningslijnen de schadelijke effecten van fijn stof niet. Hoogspanningslijnen kunnen fijn stof soms wel elektrisch opladen, maar dat is te weinig om het meer dan normaal aan longen, luchtwegen en de huid te laten ‘plakken’. Dit concludeert het RIVM uit een literatuuronderzoek in opdracht van het ministerie van VROM.

Aanleiding voor het onderzoek was de bezorgdheid over hun gezondheid van mensen die bij een drukke verkeersweg én bij een hoogspanningslijn wonen. Die bezorgdheid is het gevolg van wetenschappelijke publicaties waarin wordt beweerd dat elektrische ontladingen bij de hoogspanningsdraden fijn stof kunnen opladen. Hierdoor zou er meer fijn stof in longen, luchtwegen of op de huid blijven ‘plakken’. Dit zou er toe kunnen leiden dat de effecten van fijn stof (hart- en luchtwegaandoeningen) versterkt worden.

Het mechanisme kent vier stappen. De eerste drie stappen - het ontstaan van elektrische ontladingen bij hoogspanningslijnen, opladen van fijn stof en verspreiden van het extra geladen fijn stof door de wind - zijn met metingen aangetoond. De vierde, beslissende stap - extra neerslag van fijn stof in longen luchtwegen of op de huid - is niet aannemelijk gemaakt.

Veel extra lading op fijnstofdeeltjes leidt wel tot extra neerslag in de luchtwegen, maar daar is zeker een tien keer hogere lading voor nodig dan bij een hoogspanningslijn kan ontstaan. Eén onderzoek met een metalen mal van luchtwegen lijkt wel op extra neerslag te wijzen, maar die resultaten kunnen zonder nader onderzoek niet naar effecten op de mens worden vertaald. Ook extra neerslag op de huid is tot nu toe niet aannemelijk gemaakt.

Trefwoorden: hoogspanningslijnen; fijn stof; gezondheidseffecten; corona-ontladingen; luchtwegen

Abstract

Power lines and particulate matter

A literature survey

Currently available data do not support the claim that overhead power lines affect the adverse health effects of particulate matter. Power lines may occasionally add an electric charge to particulate matter; however, this charge is too small to result in increased particulate matter deposition in the lungs and airways and on the skin. Researchers at RIVM draw this conclusion based on a literature survey commissioned by the Dutch Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment (VROM).

The underlying motivation for the survey was the health concerns expressed by people living close to both a heavy traffic route and a power line. These concerns originate in published scientific studies in which the authors claim that electric discharges originating from power lines can charge particulate matter and that this extra charging could result in increased amounts of particulate matter being deposited in the lungs and airways or on the skin. This interaction of charge and particulate matter would enhance the already known adverse health effects (heart, lung and airways complaints) of particulate matter.

The mechanism that would lead to increased deposition consists of four steps. The first three – i.e. the generation of electric discharges by power lines, charging of particulate matter and wind-driven dispersion of charged particulate matter – have been proven by measurements. The fourth crucial step – the increased deposition of particulate matter in lungs, airways or on the skin – remains unlikely.

While it is known that a large extra charge added to particulate matter leads to extra deposition in the airways, the charge required to accomplish this is at least a tenfold higher than that produced by a power line. Only one study using a metal mould of the airways indicates extra deposition, but these results cannot be translated to effects on humans without further study. In addition, extra deposition on the skin under these circumstances has not been made plausible.

Key words: power lines; particulate matter; health effects; corona discharges; airways

Inhoud

Samenvatting		9
1	Inleiding	11
1.1	Achtergrond	11
1.2	Doelstelling	11
1.3	Leeswijzer	12
2	Werkwijze	13
3	Eigenschappen en gezondheidseffecten van fijn stof	15
3.1	Inleiding	15
3.2	Eigenschappen fijn stof	15
3.2.1	Samenstelling, concentraties en grenswaarden	15
3.2.2	Lading van fijn stof	17
3.3	Depositie van fijn stof in het ademhalingsstelsel	18
3.4	Gezondheidseffecten van inhalatie van fijn stof	21
3.4.1	Kortdurende blootstelling	22
3.4.2	Langdurige blootstelling	22
3.5	Depositie van fijn stof op de huid	22
3.6	Gezondheidseffecten van depositie van fijn stof op de huid	22
4	Hoogspanningslijnen en fijn stof	25
4.1	Inleiding	25
4.2	Corona-ionen	26
4.3	Overdracht van lading aan fijnstofdeeltjes	28
4.4	Oscillatie fijnstofdeeltjes	29
4.5	Verspreiding in de atmosfeer	30
4.6	Depositie van (geladen) fijnstofdeeltjes in luchtwegen en longen	34
4.7	Depositie van (geladen) fijnstofdeeltjes op de huid	37
4.7.1	Ladingseffecten dichtbij een hoogspanningslijn	37
4.7.2	Ladingseffecten op grotere afstand	38
4.8	Epidemiologisch onderzoek	39
5	Discussie en conclusies	41
5.1	Inleiding	41
5.2	Discussie	41
5.3	Beantwoording van de onderzoeksvragen	45
5.4	Leemten in kennis	46
5.5	Conclusies	48
Bijlage 1	Zoekwoorden en deskundigen	49
Bijlage 2	Overige grijze literatuur	51
Bijlage 3	Lijst van afkortingen	53
Literatuur		55

Samenvatting

In het Verenigd Koninkrijk hebben Henshaw en medewerkers een mechanisme voorgesteld waarin elektrische ontladingen bij de draden van een bovengrondse hoogspanningslijn fijn stof kunnen opladen. Extra lading op de fijnstofdeeltjes zou tot extra depositie in longen, luchtwegen of op de huid kunnen leiden, waardoor de gezondheidsschade die fijn stof veroorzaakt, kan worden versterkt. De publicaties van Henshaw hebben in Nederland tot onrust bij omwonenden van hoogspanningslijnen geleid, vooral in situaties waarin de fijnstofniveaus door de aanwezigheid van een drukke verkeersweg relatief hoog zijn. Deze ongerustheid was voor het ministerie van VROM aanleiding om het RIVM opdracht te geven de bestaande literatuur over gezondheidseffecten van de combinatie van bovengrondse hoogspanningslijnen en fijn stof te analyseren.

Deze rapportage bevat de resultaten van dit literatuuronderzoek. De analyse is vooral gebaseerd op publicaties in wetenschappelijke, *peer-reviewed* tijdschriften. Deze publicaties zijn aangevuld met rapportages van de Health Protection Agency (HPA) uit het Verenigd Koninkrijk, het RIVM, de Gezondheidsraad en de World Health Organisation (WHO). In enkele gevallen zijn presentaties op wetenschappelijke congressen gebruikt. Ten slotte is gebruikgemaakt van meer algemene literatuur zoals (leer)boeken en tijdschriftartikelen. In enkele gevallen zijn onderzoekers direct per e-mail benaderd voor aanvullende informatie.

Dit onderzoek beperkt zich tot gezondheidseffecten die door de combinatie van fijn stof en de aanwezigheid van een hoogspanningslijn zouden kunnen ontstaan. Het richt zich niet op gezondheidseffecten van fijn stof in het algemeen. Blootstelling aan fijn stof kan leiden tot een scala aan effecten op luchtwegen, longen, hart en bloedvaten. Over het mechanisme en de omvang van de effecten bestaat onzekerheid. Naar schatting overlijden er in Nederland elk jaar rond de 18.000 mensen vroegtijdig aan de gevolgen van blootstelling aan fijn stof.

In het door Henshaw voorgestelde mechanisme leiden elektrische ontladingen bij de draden van een hoogspanningslijn (corona-ontladingen) tot opladen van het aanwezige fijn stof. Dit extra geladen fijn stof wordt door de wind verspreid tot op enkele honderden meters afstand. Daar zou de extra lading tot extra depositie in longen, luchtwegen en op de huid kunnen leiden. Bovendien zou depositie op de huid direct onder de hoogspanningslijn door oscillatie van geladen fijnstofdeeltjes kunnen toenemen.

Uit het literatuuronderzoek blijkt dat:

- corona-ontladingen onder bepaalde omstandigheden kunnen optreden;
- corona-ontladingen tot extra lading op een fijnstofdeeltje kunnen leiden;
- de gemiddelde extra lading per deeltje varieert van 0,1 tot 0,9 elementaire lading;
- het extra geladen fijn stof zich verspreidt tot op enkele honderden meters benedenwinds van een hoogspanningslijn;
- relatief grote hoeveelheden extra lading (10 elementaire ladingen of meer) nodig zijn om tot een verhoogde depositie van fijn stof in de longen te kunnen leiden.

Het RIVM is van mening dat niet aannemelijk is gemaakt dat de hoeveelheid extra lading op fijnstofdeeltjes, die in de buurt van een hoogspanningslijn kan voorkomen, tot extra depositie in luchtwegen of longen leidt. Er is één publicatie van metingen in een metalen mal van de bovenste luchtwegen die wel op extra depositie op de metalen wand wijst voor ladingstoevoegingen van één elementaire lading. De resultaten van dit onderzoek zijn niet zonder meer naar gezondheidseffecten bij

mensen te vertalen. Ook voor een mogelijke extra depositie van fijn stof op de huid in de buurt van een hoogspanningslijn levert het literatuuronderzoek geen éénduidige ondersteuning.

Het tot nu toe gepubliceerde epidemiologische onderzoek naar gezondheidseffecten in de buurt van bovengrondse hoogspanningslijnen houdt geen rekening met invloed van de wind en interpreteert de resultaten vooral in termen van het magnetische veld. Dit onderzoek is niet geschikt voor het trekken van conclusies over gezondheidseffecten van geladen fijn stof. Momenteel lopen er in het Verenigd Koninkrijk twee epidemiologische onderzoeken die zich specifiek richten op de effecten van de combinatie van hoogspanningslijnen en fijn stof. De resultaten van die onderzoeken zijn nog niet gepubliceerd.

De belangrijkste conclusie van het literatuuronderzoek is, dat op basis van de huidige kennis niet is gebleken dat bovengrondse hoogspanningslijnen de gezondheidseffecten die door fijn stof worden veroorzaakt, kunnen beïnvloeden.

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Al meer dan vijftig jaar wordt onderzoek gedaan naar effecten die elektromagnetische velden afkomstig van bovengrondse hoogspanningslijnen op de gezondheid kunnen hebben. Al deze onderzoeken samen wijzen erop dat er meer leukemie voorkomt bij kinderen die in de buurt van een hoogspanningslijn wonen. Op dit moment is niet duidelijk of dat echt door de magnetische velden van de hoogspanningslijn wordt veroorzaakt. Mogelijk kunnen andere, nog onbekende, factoren de toename van kinderleukemie verklaren.

Omdat er wetenschappelijke aanwijzingen zijn voor een verhoogde kans op kinderleukemie en omdat niet verwacht wordt dat de wetenschappelijke onzekerheid op korte termijn zal worden opgelost, heeft voormalig staatssecretaris Van Geel van Milieu in 2005 gemeenten, provincies en netbeheerders geadviseerd uit voorzorg maatregelen te treffen [1]. Met deze maatregelen kan worden voorkomen dat het aantal kinderen dat in Nederland (langdurig) wordt blootgesteld aan magnetische velden afkomstig van bovengrondse hoogspanningslijnen, de komende jaren toeneemt.

Het beleid richt zich op nieuwe situaties en treedt bijvoorbeeld in werking bij het opstellen van nieuwe bestemmingsplannen of wijzigen van bestaande plannen en bij het vaststellen van de tracés van nieuwe bovengrondse hoogspanningslijnen of wijzigingen aan bestaande lijnen.

Bij de voorgenomen wijziging aan de 150 kV lijn in de gemeente Maarssen en tijdens de planning van een nieuwe 380 kV hoogspanningsverbinding in de Randstad, hebben omwonenden naar voren gebracht dat de elektrische velden die door de lijn worden veroorzaakt, de concentratie of de eigenschappen van het in de lucht aanwezige fijn stof kunnen beïnvloeden. Daarbij werd gesteld dat de gezondheidseffecten die met fijn stof samenhangen, daardoor mogelijk worden versterkt.

Het ministerie van VROM heeft het RIVM gevraagd om een beoordeling van de (internationale wetenschappelijke) literatuur op het aandachtsgebied elektromagnetische velden en fijn stof uit te voeren. Dit rapport geeft de resultaten van deze beoordeling.

1.2 Doelstelling

Doel van het onderzoek is het in kaart brengen, bespreken en beoordelen van de wetenschappelijke literatuur over de (mogelijke) gezondheidseffecten van de combinatie hoogspanningslijnen en fijn stof.

Op basis van de bestudeerde literatuur en de daaruit voortvloeiende wetenschappelijke informatie is geprobeerd om op de volgende vragen een antwoord te geven:

1. Beïnvloedt de aanwezigheid van een bovengrondse hoogspanningslijn de concentratie van fijn stof in de buurt van de lijn?
2. Beïnvloedt de aanwezigheid van een bovengrondse hoogspanningslijn de elektrische lading van fijnstofdeeltjes?
3. Hoe ver kunnen deze (geladen) fijnstofdeeltjes zich verplaatsen?
4. Wordt de depositie van fijnstofdeeltjes op de huid door de lading van de fijnstofdeeltjes beïnvloed?

5. Wordt de absorptie in de luchtwegen en longen door de lading van de fijnstofdeeltjes beïnvloed?
6. Leidt de aanwezigheid van een bovengrondse hoogspanningslijn via beïnvloeding van fijn stof tot een hoger gezondheidsrisico voor omwonenden?

1.3 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 is de werkwijze beschreven die tijdens het literatuuronderzoek is gevolgd. In hoofdstuk 3 worden de eigenschappen en gezondheidseffecten van fijn stof toegelicht. De bevindingen voor mogelijke beïnvloeding van fijn stof door bovengrondse hoogspanningslijnen zijn opgenomen in hoofdstuk 4. Het rapport eindigt met een discussie, met de beantwoording van de onderzoeksvragen en met de conclusies (hoofdstuk 5).

2 Werkwijze

Peer-reviewed tijdschriften

Het literatuuronderzoek is gestart op basis van de wetenschappelijke publicaties in het literatuurbestand van het Laboratorium voor Stralingsonderzoek (LSO) van het RIVM en de publicaties die de basis vormden voor het literatuuronderzoek van de National Radiological Protection Board (NRPB) in het Verenigd Koninkrijk uit 2004 [2]. In deze publicaties is gericht gezocht naar referenties die specifiek betrekking hebben op hoogspanningslijnen en fijn stof. Door het doorzoeken van de digitale wetenschappelijke literatuurbestanden is deze voorlopige selectie in februari 2007 geactualiseerd (voor de zoektermen zie Bijlage 1). In enkele gevallen (Draper, Preece en Keitch) is de auteur naar aanleiding van zijn publicaties direct per e-mail om aanvullende informatie gevraagd. Ten slotte is tijdens het bestuderen van de literatuur informeel overlegd met enkele deskundigen op het gebied van luchtkwaliteit, fijn stof of hoogspanningslijnen (voor de namen zie Bijlage 1). Dit overleg was vooral bedoeld om te onderzoeken of de literatuurkeuze voldoende dekkend was en om meer inzicht in de problematiek van fijn stof en hoogspanningslijnen te krijgen. Uiteindelijk heeft deze aanpak geleid tot selectie van een vijftigtal publicaties uit *peer-reviewed* wetenschappelijke tijdschriften.

Overige publicaties

Er zijn ook publicaties geëvalueerd die niet in *peer-reviewed* tijdschriften zijn verschenen, de zogenaamde grijze literatuur. Een belangrijke publicatie in deze categorie is het eerder genoemde rapport van de voormalige Britse National Radiological Protection Board uit 2004 [2]. In augustus 2007 is nog de Extremely Low Frequency Fields Environmental Health Criteria Monograph van de Wereldgezondheidsorganisatie toegevoegd [3]. Deze groep omvat ook de publicatie 'Fijn stof nader bekeken' van het Milieu en Natuur Planbureau (MNP) en twee publicaties van de Gezondheidsraad [4, 5]. Ook presentaties op wetenschappelijke congressen en 'letters to the editor' van wetenschappelijke tijdschriften, die meestal niet *peer-reviewed* zijn vallen binnen deze categorie. Ten slotte bevat deze categorie de overige verwijzingen (niet naar *peer-reviewed* tijdschriften) die in de discussie met bewonersgroepen naar voren zijn gekomen (zie bijvoorbeeld [6]). Vaak zijn genoemde boeken en rapporten moeilijk te achterhalen. Meestal gaat het om publicaties die meer dan twintig jaar oud zijn en/of niet specifiek over hoogspanningslijnen en fijn stof gaan. Deze publicaties zijn opgesomd in Bijlage 2 en worden hier niet verder besproken.

Overleg

Het eerste concept van het rapport is voor commentaar aan de opdrachtgever voorgelegd. Na verwerking van dat commentaar is het concept eindrapport intern binnen het Laboratorium voor Stralingsonderzoek *ge-peer-reviewed*. Tijdens het onderzoek heeft overleg plaatsgevonden met enkele deskundigen (zie Bijlage 1).

3 Eigenschappen en gezondheidseffecten van fijn stof

3.1 Inleiding

Voor een goed begrip van de invloed van extra lading op fijn stof is achtergrondinformatie nodig over de eigenschappen van fijn stof, wat er tijdens in- en uitademen met fijn stof gebeurt, hoe fijn stof op de huid terecht kan komen en welke gezondheidseffecten bekend zijn. Het hier gegeven overzicht is ontleend aan publicaties van de NRPB [2] en van het MNP [7]. Dit hoofdstuk beschrijft de normale atmosferische omstandigheden zonder de aanwezigheid van een bovengrondse hoogspanningslijn.

3.2 Eigenschappen fijn stof

3.2.1 Samenstelling, concentraties en grenswaarden

Wat is fijn stof

Fijn stof is een verzamelnaam voor luchtverontreiniging met een kleine deeltjesgrootte. Het is een complex mengsel van deeltjes van verschillende grootte met verschillende eigenschappen. Ongeveer 55% van de fijnstofbestanddelen is van natuurlijke oorsprong (zeezout, bodemstof, waterdamp). De rest is door mensen gemaakt (verkeer, industrie, landbouw). Belangrijke bestanddelen zijn: kleine deeltjes afkomstig van de bodem, zeezoutaerosolen, waterdruppeltjes, roetdeeltjes, gasvormige luchtverontreiniging (SO₂, NO_x, NH₃), vervalproducten van radon, bacteriën, virussen en stuifmeel.

Grootteverdeling fijn stof

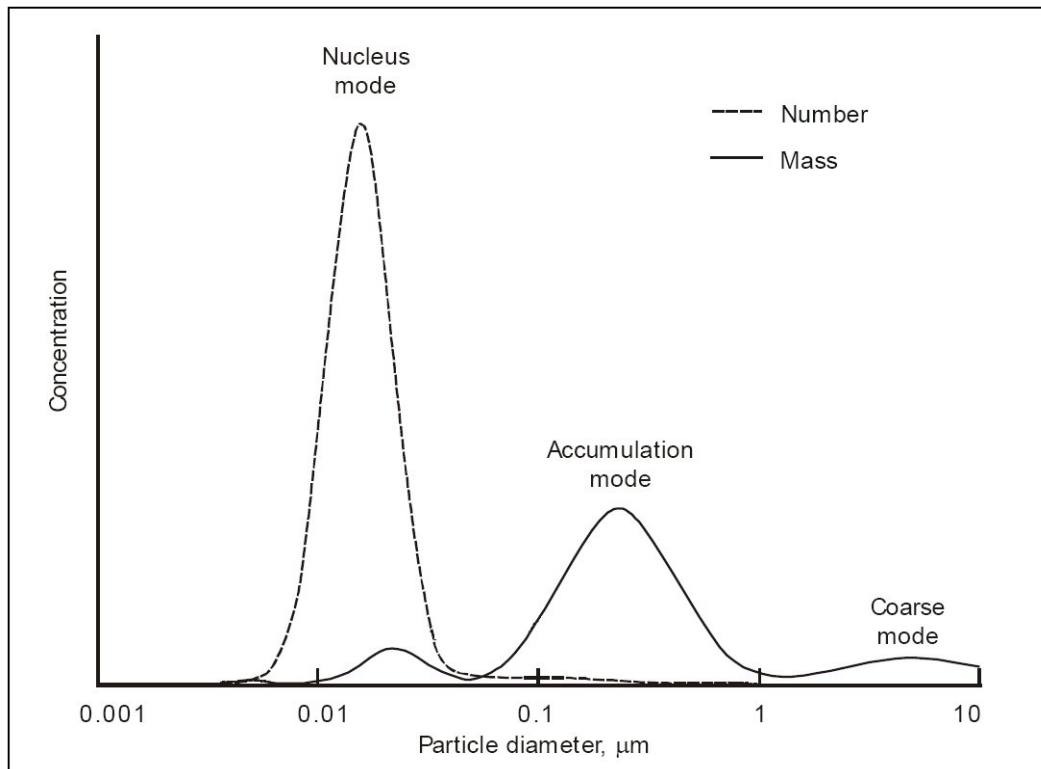
Naar grootte worden de fijnstofdeeltjes onderscheiden in de ultrafijne (*nucleus mode*), de fijne (*accumulation mode*) en de grove (*coarse mode*) fractie. Figuur 1 geeft zowel het aantal deeltjes met een bepaalde grootte als de massa van de deeltjes met een bepaalde grootte. Deze verdeling is bedoeld als illustratie omdat de werkelijke deeltjesverdeling sterk afhankelijk is van tijd en plaats. In het algemeen is het aantal deeltjes in de fijne en ultrafijne fractie veel groter dan in de grove fractie. De fijne en de grove fractie dragen het meeste aan de totale massa fijn stof bij. Ter illustratie: één enkel 1 µm deeltje is even zwaar als 1 miljoen 0,01 µm deeltjes.

Monitoren fijn stof

Het monitoren van fijn stof vindt internationaal plaats door de concentratie van PM₁₀ te meten: de totale massa per luchtvolume van alle deeltjes met een diameter kleiner dan 10 µm. In Nederland wordt in het Landelijk Meetnet Luchtkwaliteit de concentratie van PM₁₀ landsdekkend gemeten. De jaargemiddelde concentratie van PM₁₀ varieert ruwweg tussen 20 en 40 µg/m³. Het jaargemiddelde toont een neerwaartse trend. In 2003 bedroeg het jaargemiddelde 34 µg/m³ [7]. Waarschijnlijk hebben de grofste deeltjes niet de grootste invloed op de gezondheid. In een recente aanbeveling [8] raadt de Wereldgezondheidsorganisatie daarom aan om de kleinere deeltjesfracties als indicator te gebruiken. In de nabije toekomst wordt daarom mogelijk ook de concentratie van PM_{2,5} (de totale massa per volume eenheid van alle deeltjes met een diameter kleiner dan 2,5 µm) gemeten omdat die gezondheidkundig van groter belang zou kunnen zijn dan de concentratie van PM₁₀.

Europese regelgeving voor fijn stof

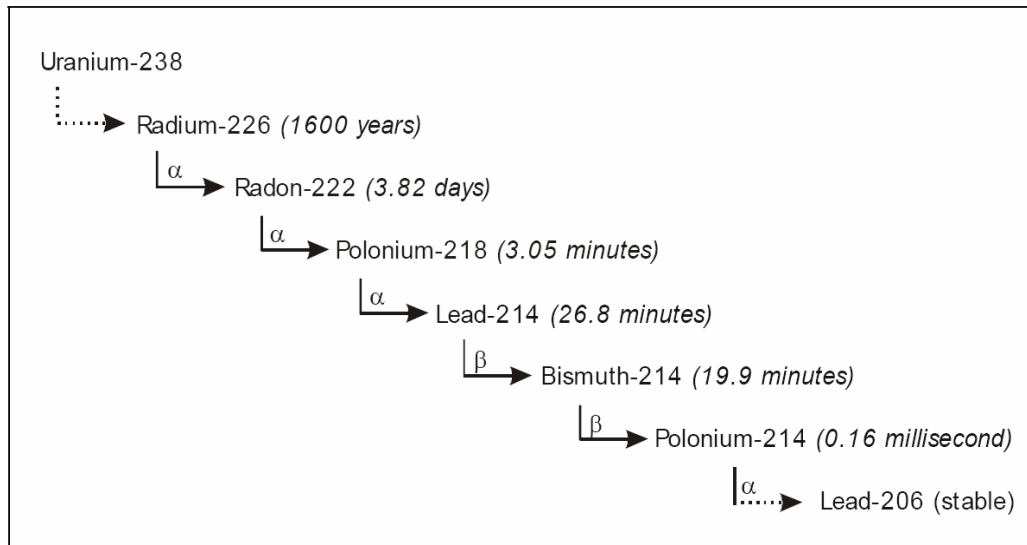
De Europese kaderrichtlijn luchtkwaliteit [9] legt ter bescherming van de gezondheid twee grenswaarden voor PM₁₀ vast. Allereerst mag de jaargemiddelde concentratie van PM₁₀ op een bepaalde plek niet hoger zijn dan 40 µg/m³. Daarnaast mag de daggemiddelde PM₁₀-concentratie slechts op maximaal 35 dagen per jaar boven de 50 µg/m³ uitkomen. Sinds 1 januari 2005 moet de luchtkwaliteit aan beide grenswaarden voldoen.



Figuur 1 Voorbeeld van de grootteverdeling van de fijnstofdeeltjes (*nucleus mode* = ultrafijne fractie; *accumulation mode* = fijne fractie; *coarse mode* = grove fractie; bron: NRPB [2]).

Radon

De vervalproducten die door radioactief verval uit het gasvormige radon ontstaan, de zogenaamde radondochters, vormen één van de fijnstofbestanddelen die in de buurt van hoogspanningslijnen van belang kunnen zijn. Radon ontstaat voortdurend door verval van uranium dat van nature in de bodem en in sommige bouwmaterialen aanwezig is. Radon-222 vervalft via α en β -verval uiteindelijk tot stabiel lood. Bij dat verval komt ioniserende straling vrij. Radon zelf is een gas, maar de meeste vervalproducten zijn vaste stoffen. Deze radondochters kunnen zich hechten aan fijnstofdeeltjes (de gebonden fractie) of vrij door de lucht blijven bewegen (ongebonden fractie). De deeltjesgrootte van de ongebonden fractie ligt in de orde van 1-10 nanometer. De gebonden fractie heeft een deeltjesgrootte tussen 0,1 en 1 µm [2]. Radondochters kunnen terechtkomen op allerlei oppervlakten waaronder huid, kleding en het slijmvlies waar de luchtwegen mee zijn bekleed. De belangrijkste radondochters zijn weergegeven in Figuur 2. De isotopen die voor de discussie over fijn stof en hoogspanningslijnen niet van belang zijn, zijn weggelaten. Dit geven de gestippelde pijlen weer. De concentratie van radon in de buitenlucht is meestal laag, maar binnenshuis kan radon zich ophopen.



Figuur 2 De belangrijkste radondochters in de vervalreeks van Radon-222 met tussen haken de halfwaardetijden (bron: NRPB [2]).

3.2.2 Lading van fijn stof

In de atmosfeer ontstaan door natuurlijke processen zoals kosmische straling, UV-straling en onweer voortdurend ionen. Boven land worden elke seconde ongeveer 10 ionenparen per cm^3 gevormd. Deze ionen kunnen recombineren, waardoor weer een neutraal deeltje ontstaat, of zich hechten aan fijnstofdeeltjes in de lucht. Uiteindelijk ontstaat een evenwicht tussen vorming en recombinatie van ionen (enkele nanometers in diameter). Gemiddeld zijn er boven land ongeveer 10^9 ionen per m^3 , waarbij het aantal positieve en negatieve ionen vrijwel gelijk is. Deze ionen botsen met de fijnstofdeeltjes in de atmosfeer en laden die deeltjes op. Dit proces wordt diffusie-oplading genoemd. Hoe groter een fijnstofdeeltje hoe groter de trefkans. Grotere deeltjes worden dus gemakkelijker ‘opgeladen’. Onder stabiele atmosferische omstandigheden, als de atmosfeer in thermisch evenwicht is, wordt de lading als functie van de grootte van de deeltjes beschreven door de zogenaamde Maxwell-Boltzmann verdeling. In Tabel 1 is weergegeven hoe de lading van de fijnstofdeeltjes onder deze stabiele atmosferische omstandigheden samenhangt met hun grootte. De tabel geeft voor elke deeltjesdiameter het percentage deeltjes met 1, 2, 3 of meer elementaire ladingen¹. Hoewel minder volledig, wordt vaak de gemiddelde (absolute) lading per deeltje als parameter voor de ladingsverdeling gebruikt. Deze gemiddelde lading per deeltje is uiteraard niet altijd een geheel aantal elementaire ladingen. Korteheidshalve gebruiken we in dit rapport deze gemiddelde lading per deeltje om de lading(sverdeling) over de fijnstofdeeltjes te karakteriseren. In kolom 2 van Tabel 1 is ook de gemiddelde lading per deeltje onder stabiele atmosferische omstandigheden gegeven.

¹ e is de elementaire lading van een elektron, $1,6 \cdot 10^{-19}$ Coulomb.

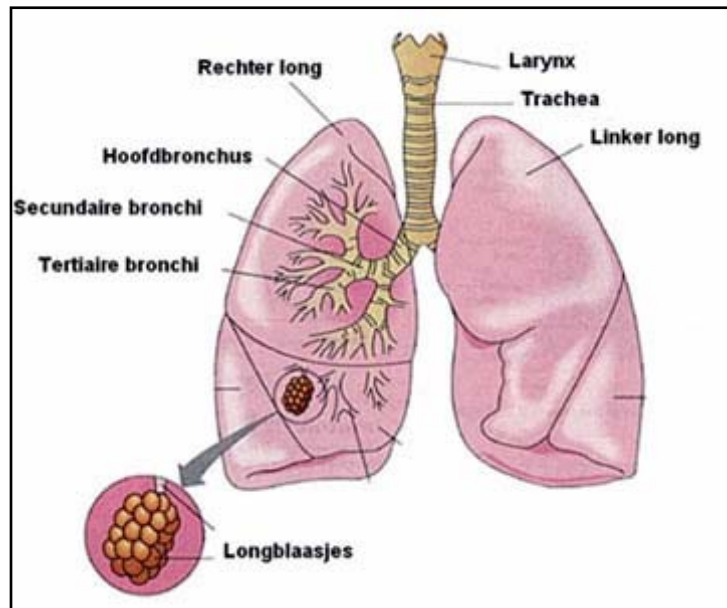
Tabel 1 Lading op atmosferische fijnstofdeeltjes in thermisch evenwicht (bron: NRPB [2])

diameter deeltjes (μm)	gemiddelde lading per deeltje	percentage deeltjes met het aangegeven aantal elementaire ladingen									
		< -3	-3	-2	-1	0	1	2	3	>3	
0,01	0,007	-	-	-	0,3	99,3	0,3	-	-	-	-
0,05	0,411	-	-	0,6	19,3	60,2	19,3	0,6	-	-	-
0,1	0,672	-	0,3	4,4	24,1	42,6	24,1	4,4	0,3	-	-
0,5	1,64	4,6	6,8	12,1	17,0	19,0	17,0	12,1	6,8	4,6	-
1,0	2,34	11,8	8,1	10,7	12,7	13,5	12,7	10,7	8,1	11,8	-
5,0	5,28	29,8	5,4	5,8	6,0	6,0	6,0	5,8	5,4	29,8	-
10,0	7,47	35,4	4,0	4,2	4,2	4,3	4,2	4,2	4,0	35,4	-

Meer dan 99% van de deeltjes kleiner dan 0,01 μm is ongeladen. Van de deeltjes groter dan 10 μm heeft meer dan 70% een lading groter dan 3e. In de praktijk blijkt de lading van de fijnstofdeeltjes niet altijd volgens de Maxwell-Boltzmann te zijn verdeeld. Dit geldt vooral voor de fijne en ultrafijne fracties (< 0,5 μm). De ladingsverdeling is asymmetrisch, meestal met een overschot aan negatieve deeltjes en er zijn meer deeltjes geladen dan de Maxwell-Boltzmann verdeling voorspelt. Een mogelijke oorzaak hiervoor kan zijn dat fijnstofdeeltjes tijdens productie in motoren, verwarming en schoorstenen, en dergelijke opgeladen worden. Bij ionendichtheden van 10^9 per m^3 kost het ongeveer 100 minuten om de Maxwell-Boltzmannverdeling te bereiken.

3.3 Depositie van fijn stof in het ademhalingsstelsel

Het ademhalingsstelsel bestaat uit twee gedeelten: het alveolaire gebied (longblaasjes) waar de eigenlijke gaswisseling plaatsvindt en de toevoerende luchtwegen (neusholte, mondholte, luchtpijp, bronchiën). De toevoerende luchtwegen zorgen voor zuivering en voorbehandeling (opwarming, bevochtiging) van de ingeademde lucht. Neus- en mondholte vormen het begin van het ademhalingsstelsel. De neusholte heeft een kleine doorsnede, de luchtsnelheid is hoog en door de vouwen en bochten worden ultrafijne en grove stofdeeltjes efficiënt gefilterd. Depositie in de mondholte is meer variabel (afhankelijk van hoever de mond is geopend) en voor alle deeltjesgroottes minder dan in de neusholte. De luchtpijp splitst zich in twee hoofdbronchiën die zich op hun beurt weer splitsen. In totaal is er een twintigtal van deze splitsingen. Via dit buizenstelsel komt de ingeademde lucht in ongeveer 300 miljoen longblaasjes terecht. Bij elke splitsing is de doorsnede van de aftakking kleiner in diameter, maar omdat er meer aftakkingen zijn neemt de totale doorsnede steeds toe, waardoor de snelheid van de lucht afneemt naarmate deze dieper doordringt. In de longblaasjes is de lucht vrijwel tot stilstand gekomen.

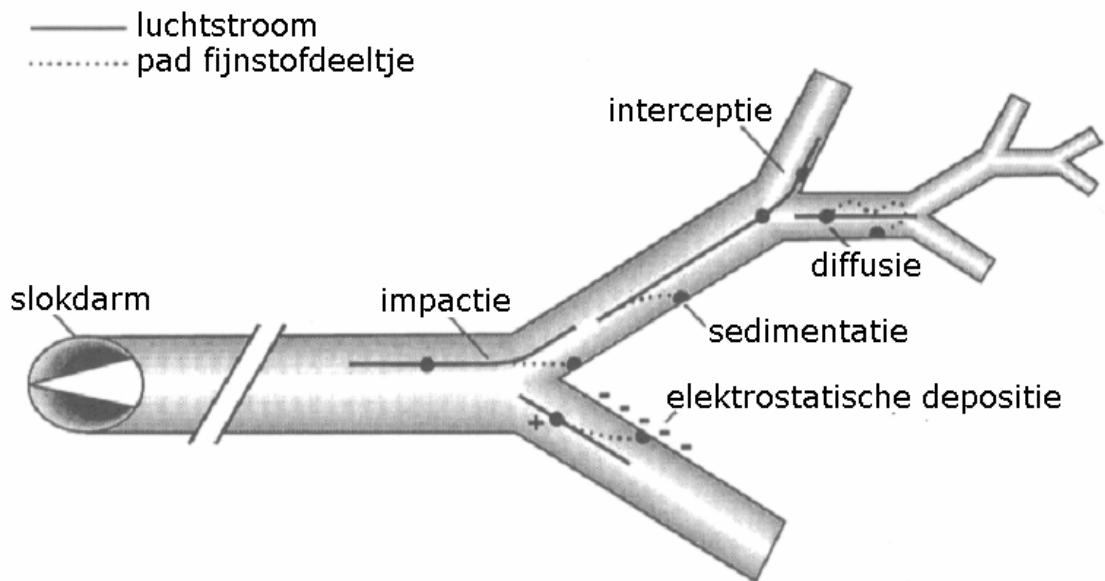


Figuur 3 De belangrijkste componenten van het ademhalingsstelsel (bron: NRR [10])

Fijnstofdeeltjes komen met de ingeademde lucht in de bovenste en onderste luchtwegen en in de longen terecht. Een deel van de fijnstofdeeltjes blijft achter in de neus, op de wand van de luchtwegen en in de longen (depositie). Een ander deel wordt weer afgevoerd met de uitademing. Depositie in het ademhalingsstelsel is een complex proces, gestuurd door een aantal fysische processen:

- sedimentatie:
uitzakken van relatief zware fijnstofdeeltjes onder invloed van de zwaartekracht;
- diffusie:
bewegen van fijnstofdeeltjes door (stilstaande) lucht onder invloed van concentratieverschillen;
kleine deeltjes hebben een grotere diffusiesnelheid dan grote deeltjes;
- impactie:
als lucht om een obstakel (trilhaar, splitsing van de bronchiën) heen moet stromen zullen de fijnstofdeeltjes door hun traagheid rechtdoor blijven gaan en een hogere kans hebben om daar te blijven steken;
- interceptie:
een fijnstofdeeltje komt zo dichtbij de wand dat het wordt onderschept en blijft 'plakken';
- elektrostatische depositie:
het vochtige slijmvlies dat longen en luchtwegen bekleedt kan worden gezien als een gearde geleider; geladen deeltjes zullen door de geleider extra worden aangetrokken.
- turbulentie:
door turbulentie in de in- of uitgeademde lucht neemt de kans dat een fijnstofdeeltje deponert toe.

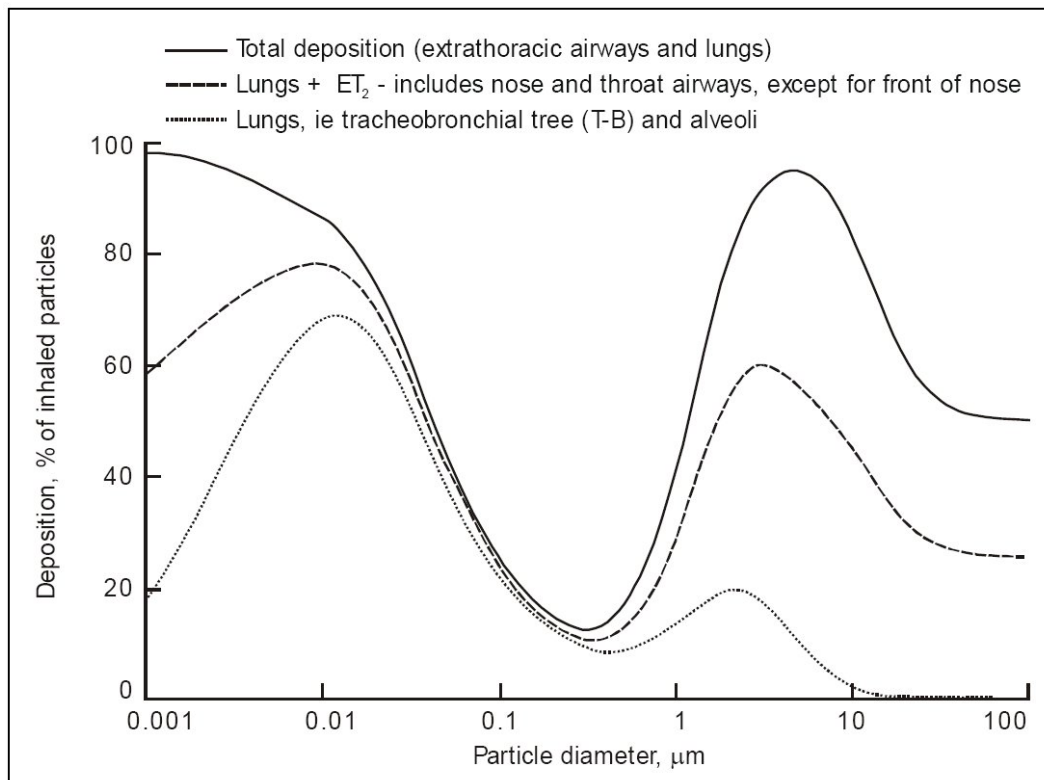
Deze processen zijn, op turbulentie na, weergegeven in Figuur 4.



Figuur 4 Fysische processen die de depositie van fijn stof in de luchtwegen en longen beïnvloeden (turbulentie is niet in de figuur weergegeven)

Er zijn modellen ontwikkeld om te berekenen welke deeltjesgrootte op welke plek in het ademhalingsstelsel wordt gedeponerd. Eén van de meest toegepaste is het door de International Commission on Radiological Protection (ICRP) ontwikkelde 'Human Respiratory Tract Model' (HRTM² [11]). Modelberekeningen met dit ICRP-model laten zien welk deel van de ingeademde fijnstofdeeltjes - afhankelijk van de deeltjesgrootte - in de longen achterblijft (Figuur 5). Nieuwere modellen houden met meer aspecten van longen en luchtwegen rekening. Het Multiple Path Particle Dosimetry-model (MPPD), ontwikkeld door het Chemical Industry Institute of Toxicology in de Verenigde Staten in nauwe samenwerking met het RIVM, brengt klaring, retentie en hygroscopiciteit in rekening [12].

² In het ICRP-model worden de luchtwegen (*extrathoracic airways, ET*) verdeeld in ET₁, het voorste deel van de neusholte waaruit door snuiten deeltjes kunnen worden verwijderd, en ET₂, de rest van de luchtwegen, van waaruit deeltjes naar de keel kunnen verdwijnen en worden doorgeslikt. Er wordt aangenomen dat vanuit ET₂ wel enige opname in het bloed mogelijk is, terwijl dat vanuit ET₁ niet mogelijk is.



Figuur 5 Depositie van fijnstofdeeltjes (als percentage van het aantal ingeademde deeltjes van die grootte) in luchtwegen en longen voor verschillende deeltjesgroottes (bron: NRPB [2]).

Voor grove deeltjes (> 2 µm) en fijne deeltjes (< 0,05 µm) is de depositie hoog. Deeltjes met een diameter tussen 0,1 en 1 µm worden veel minder gedeponereerd (< 20%).

3.4 Gezondheidseffecten van inhalatie van fijn stof

Inhalatie van fijn stof veroorzaakt hart- en luchtwegaandoeningen die leiden tot vroegtijdige sterfte [7]. Welke bestanddelen van het fijn stof de uiteindelijke gezondheidseffecten veroorzaken is niet duidelijk. Fijnstofdeeltjes afkomstig van verkeer, scheepvaart, industrie en woningverwarming zijn waarschijnlijk belangrijk [7]. Ook vervalproducten van radon dragen bij aan gezondheidseffecten. Andere fracties zoals zeezoutaerosolen, sulfaat- en nitraataerosolen dragen volgens de huidige kennis niet of weinig bij aan gezondheidseffecten.

Het biologische mechanisme waardoor fijn stof gezondheidsschade veroorzaakt, is niet volledig begrepen. In de bovenste luchtwegen kan fijn stof dat door het neusepitheel wordt geabsorbeerd, direct naar de hersenen worden getransporteerd met als mogelijke gezondheidseffecten hoofdpijn en concentratieproblemen. Dieper in het ademhalingsstelsel, in de longen, spelen ontstekingsreacties waarschijnlijk een belangrijke rol waardoor de zuurstofopname wordt bemoeilijkt en waarbij radicaalverbindingen vrijkomen [7]. De ladingstoestand van de fijnstofdeeltjes zou bij translocatie over membranen een rol kunnen spelen [13, 14].

In de epidemiologische onderzoeken is geen drempelwaarde voor effecten van blootstelling aan fijn stof gevonden. Dit geldt zowel voor kortdurende als voor langdurige blootstelling. Internationaal wordt daarom aangenomen dat er geen concentratie van fijn stof is waaronder geen gezondheidseffecten zullen optreden. Bij risicoschattingen voor langetermijneffecten gaat men daarom uit van een lineaire relatie tussen fijnstofconcentratie en effecten, zonder drempelwaarde.

Gezondheidseffecten van fijn stof vallen in twee categorieën uiteen: effecten die samenhangen met kortdurende blootstelling en effecten die met langdurige blootstelling samenhangen.

3.4.1 Kortdurende blootstelling

Bij mensen die leiden aan ziekten van longen en luchtwegen of die kampen met hartproblemen kan kortdurende blootstelling aan hoge concentraties fijn stof fatale gevolgen hebben. In Nederland overlijden jaarlijks waarschijnlijk ongeveer 3000 personen vroegtijdig aan de gevolgen van deze kortdurende blootstelling. Meestal gaat het om personen die al in slechte conditie zijn. De duur van de levensverkorting is enkele dagen tot maanden [7].

3.4.2 Langdurige blootstelling

Ook langdurige blootstelling aan fijn stof - gedurende enkele jaren of een heel leven - leidt tot gezondheidsschade [7]. Betrouwbare gegevens voor Nederland en Europa ontbreken. Als de gegevens van twee uitgebreide Amerikaanse epidemiologische onderzoeken vertaald worden naar de Nederlandse situatie, leidt dat jaarlijks tot ongeveer 18.000 personen (onzekerheidsmarge 12.000 - 24.000) die vroegtijdig overlijden [7]. De levensduurverkorting in deze groep personen is volgens een voorlopige schatting tien jaar, maar het zou ook om een geringere levensduurverkorting voor een grotere groep mensen kunnen gaan. Ondanks de grote onzekerheid in dit soort risicoschattingen zijn de gevolgen van langdurige blootstelling aan fijn stof dus ernstiger in omvang dan die van kortdurende blootstelling.

3.5 Depositie van fijn stof op de huid

Fijnstofdeeltjes deponeren niet alleen in longen en luchtwegen, maar komen ook op huid, haar en kleding van mensen terecht. De fysische processen die de depositie van fijnstofdeeltjes op de huid sturen zijn in principe dezelfde als die in de luchtwegen (zie paragraaf 3.3 en Figuur 4). In tegenstelling tot het ademhalingsstelsel is er bij de huid meestal geen sprake van een gerichte luchtstroom langs de huid waarin de fijnstofdeeltjes met relatief grote snelheden bewegen. Bovendien is meestal een groot gedeelte van de huid bedekt waardoor depositie op de huid niet plaats kan vinden.

3.6 Gezondheidseffecten van depositie van fijn stof op de huid

De effecten van fijnstofdeeltjes die op de huid worden gedeponerd, hangen af van de hoeveelheid en de eigenschappen van de deeltjes. Op kleding en haar zullen fijnstofdeeltjes geen gezondheidseffecten veroorzaken. Als fijnstofdeeltjes op de huid terechtkomen, kan dat schadelijk zijn. Gezondheidsschade kan ontstaan doordat de fijnstofdeeltjes radioactief zijn (radonochters), maar ook doordat de fijnstofdeeltjes tot schadelijke chemische of biologische reacties op de huid leiden (teer, PAK's, ozon, bacteriën). Radioactieve deeltjes leiden tot extra stralingsbelasting van de huid of, na penetratie door de huid, van de interne organen [15]. Hierdoor kan huidkanker of kanker van de inwendige organen ontstaan. Chemische stoffen kunnen leiden tot irritatie van de huid en huidziekten [16]. Als de

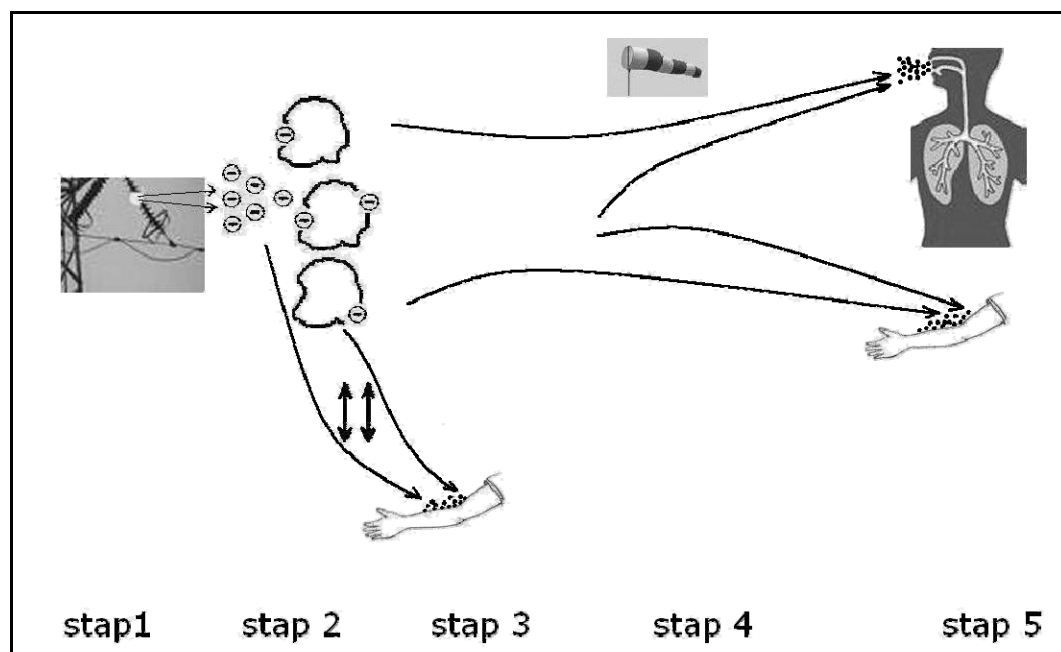
chemische stof carcinogeen is, kan ook huidkanker ontstaan. Ten slotte kunnen bacteriën en virussen die op de huid komen tot infecties leiden. Kwantitatieve schattingen voor de gezondheidseffecten van depositie van fijn stof op de huid ontbreken vrijwel. Eatough en Henshaw [17] schatten dat in het Verenigd Koninkrijk mogelijk 13% van de huidkankergevallen toe te schrijven is aan depositie van radonochters op de huid. Volgens Harley et al. zou mogelijk 20% van de basaalcelcarcinomen aan stralingsblootstelling door radonochters zijn toe te schrijven [18]. Een recente risicoschatting en een onderbouwing van deze cijfers uit epidemiologische onderzoeken ontbreken echter.

4 Hoogspanningslijnen en fijn stof

4.1 Inleiding

Bovengrondse hoogspanningslijnen kunnen het elektrische veld in de buurt beïnvloeden [19]. Uitgebreide metingen aan een 400 kV gelijkspanningslijn toonden aan dat dit effect veroorzaakt werd doordat er bij de hoogspanningslijnen ionen vrijkomen, de zogenaamde corona-ionen, die zich binden aan stof in de lucht dat door de wind wordt meegenomen [20]. Het effect was tot op honderden meters van de hoogspanningslijn meetbaar.

In 1996 is door Henshaw de hypothese naar voren gebracht dat bepaalde geladen fijnstofdeeltjes dichtbij een hoogspanningslijn door extra depositie op de huid tot gezondheidseffecten zouden kunnen leiden. Later werd gesteld dat de extra lading op fijnstofdeeltjes tot op grote afstand van de hoogspanningslijn tot extra depositie in de longen zou kunnen leiden [21]. In Figuur 6 is schematisch weergegeven hoe de interactie tussen corona-ionen en fijnstofdeeltjes in de buurt van bovengrondse hoogspanningslijnen tot extra gezondheidseffecten zou kunnen leiden.



Figuur 6 Processen waardoor corona-ontladingen bij een bovengrondse hoogspanningslijn tot gezondheidseffecten zouden kunnen leiden door extra depositie van (geladen) fijnstofdeeltjes in de longen of op de huid.

Er kunnen vijf stappen worden onderscheiden (Figuur 6):

- stap 1: de vorming van de corona-ionen;
- stap 2: overdracht van lading van de corona-ionen aan kleine en grotere fijnstofdeeltjes;
- stap 3: geladen fijnstofdeeltjes kunnen dichtbij de hoogspanningslijn, binnen circa 50 meter, gaan oscilleren in het 50 Hz elektrische veld en komen op de huid terecht;
- stap 4: geladen fijnstofdeeltjes worden door de wind tot ver van de hoogspanningslijn verspreid;

- stap 5: de geladen fijnstofdeeltjes kunnen ver van de hoogspanningslijn in de longen en op de huid terecht komen.

De literatuurgegevens voor elk van de vijf stappen in het bovengeschetste proces worden in de volgende paragrafen beschreven en beoordeeld. Van de mogelijke gezondheidseffecten ligt de nadruk op inhalatie en depositie in de longen. Dit hoofdstuk wordt afgesloten met een korte evaluatie van epidemiologische gegevens over fijn stof en hoogspanningslijnen.

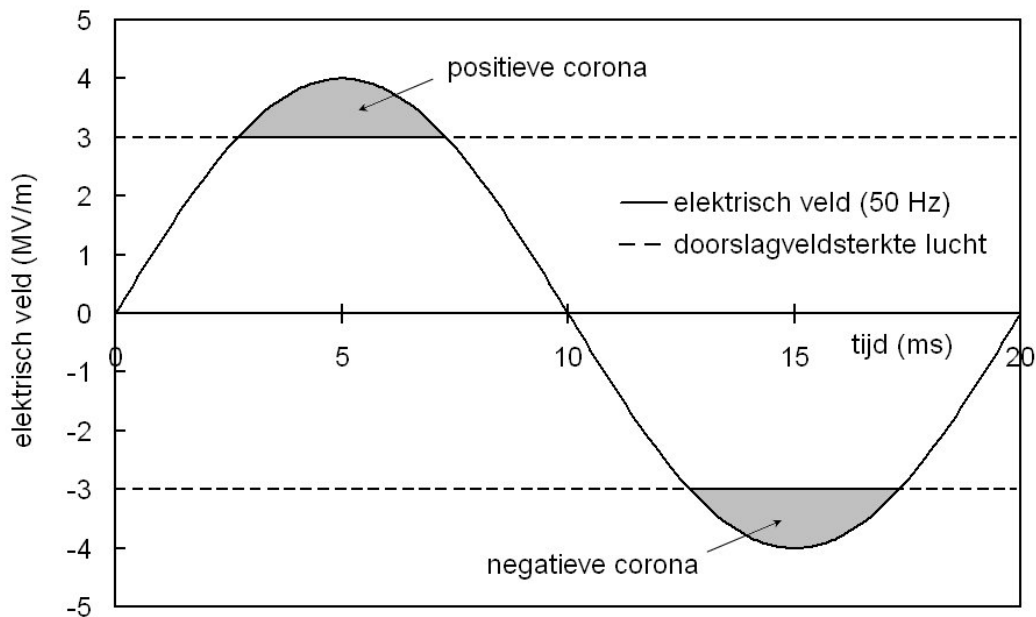
4.2 Corona-ionen

Inleiding

Bovengrondse hoogspanningslijnen hebben in Nederland een spanning variërend van 50 duizend tot 380 duizend volt (50 tot 380 kV). Dergelijke spanningen kunnen onder bepaalde omstandigheden tot (elektrische) doorslag leiden. Met doorslag bedoelen we het verschijnsel dat een gasmengsel in een sterk elektrisch veld geleidend wordt, waardoor er kortdurend een hoge stroom gaat lopen. Bliksem is het bekendste voorbeeld van doorslag. Bij een hoogspanningslijn treedt doorslag op als het elektrische veld op de geleiders of bij de isolatoren waarmee de geleiders aan de hoogspanningsmast zijn opgehangen, zo sterk wordt dat de doorslagveldsterkte van lucht (voor droge lucht 3 MV/m), wordt bereikt. Boven deze veldsterkte kan er een ontlading in de lucht rond de geleiders of isolatoren plaatsvinden, een zogenaamde corona-ontlading. Deze ontladingen treden vooral op bij onregelmatige, puntige oppervlakten die door vervuiling of beschadiging van de hoogspanningsdraden kunnen ontstaan. Omdat de doorslagveldsterkte voor vochtige lucht lager is zullen corona-ontladingen vaker optreden onder vochtige atmosferische omstandigheden, maar ook bij droog en helder weer zijn corona-ontladingen waargenomen. Als het donker is zal een dergelijke corona-ontlading zichtbaar zijn als een dunne, blauwe draadvormige ontlading. Corona-ontladingen gaan vaak gepaard met een knetterend geluid. Hoogspanningslijnen kunnen met behulp van speciale UV-gevoelige camera's op corona-ontladingen worden geïnspecteerd.

Corona-ontladingen

Boven de doorslagveldsterkte worden moleculen in de lucht geïoniseerd waardoor elektronen vrijkomen. Deze elektronen worden zodanig versneld dat ze door botsing weer nieuwe moleculen (zuurstof, stikstof, etc.) kunnen ioniseren. Door deze ionisatie ontstaan ion-elektron paren die versneld worden in het elektrische veld. De vrijkomende elektronen kunnen op hun beurt weer nieuwe moleculen ioniseren waardoor een sneeuwbaaleffect ontstaat. Het resultaat is een kortdurende stroom door de geïoniseerde lucht. Als de 'corona-elektrode' negatief geladen is, zullen de elektronen zich van de elektrode af bewegen. De positieve ionen die door botsing ontstaan bewegen naar de elektrode toe. Een negatieve corona brengt daarmee negatieve ionen en elektronen in de atmosfeer. Als de corona-elektrode positief geladen is, bewegen de elektronen zich naar de elektrode toe en worden de geïoniseerde positieve ionen afgestoten. Een positieve corona is dus een bron van positieve ionen. De ionen die ontstaan zijn afkomstig van zuurstof en stikstofverbindingen in de lucht: O^- , OH^- , O_3^- , H^+ , NO^+ , NO_2^+ [22]. Een puntontlading op een geleider of isolator kan een stroom van enkele honderden microampères opleveren [23]. De schattingen voor de corona-verliezen aan een geleider lopen uiteen van 10 mA/m [23] via 1 mA/m [21] tot 0,1 mA/m [24]. Een corona-verlies van 1 mA/m komt overeen met het vrijkomen van $6,25 \cdot 10^{15}$ (elementaire) ladingen per seconde voor elke meter geleider waar de corona-ontlading plaatsvindt. Het grootste gedeelte van die ladingen wordt weer door de hoogspanningslijn geabsorbeerd, maar er blijft een substantiële flux van lading naar de atmosfeer over [24]. Vaak is de oorzaak van een corona-ontlading een hoge gelijkspanning, maar ook bij wisselspanning kan onder bepaalde omstandigheden de elektrische veldsterkte zo hoog oplopen dat gedurende een gedeelte van de cyclus corona-ontladingen kunnen ontstaan (Figuur 7).



Figuur 7 Elektrische veldsterkte zoals die onder bepaalde omstandigheden op sommige plekken bij een bovengrondse hoogspanningslijn zou kunnen optreden. Als de absolute waarde van de veldsterkte boven de 3 MV/m komt, kan een corona-ontlading ontstaan.

Corona-ontladingen en ontwerp van de hoogspanningslijn

Bovengrondse hoogspanningslijnen worden ontworpen om het optreden van corona-ontladingen zoveel mogelijk te voorkomen. Corona-ontladingen leiden namelijk tot transportverliezen, ze geven hinder (lichtflitsen en geluid) voor de omwonenden en kunnen het radioverkeer storen. Ook kunnen corona-ontladingen tot beschadigingen van geleiders en isolatoren leiden. Om corona-ontladingen te voorkomen moet de diameter van de geleider passen bij het spanningsniveau. Een tweede maatregel is om elk circuit uit te voeren in bundels van twee, drie of vier draden, die met afstandhouders uit elkaar worden gehouden. Door het splitsen in bundels zal de lading op het oppervlak van de individuele geleiders lager zijn dan bij één zware geleider, waardoor het elektrische veld lager blijft. Ook de isolatoren waarmee de geleiders aan de mast hangen, worden zo ontworpen dat de kans op corona-ontladingen minimaal is.

Optreden van corona-ontladingen

Ondanks deze voorzorgen kunnen corona-ontladingen toch optreden op plekken waar het oppervlak van geleiders of isolatoren door vervuiling of beschadiging onregelmatig of puntig is geworden. Daarbij zijn twee factoren van belang: de conditie van de hoogspanningslijn (geleiders en isolatoren) en de weersomstandigheden. Beschadigingen van het geleideroppervlak, vervuiling op de geleiders (stof, zure regen, vogelpoep, waterdruppels, algen) kunnen ontladingspunten voor corona-ontladingen worden. Ook beschadigingen aan de isolatoren en vervuiling leiden op die plek tot hogere veldsterkten met kans op corona-ontladingen. Ten slotte zijn ook de weersomstandigheden belangrijk. Vochtige lucht (mist, regen) en vervuilde lucht heeft een lagere doorslagveldsterkte dan schone, droge lucht. Hierdoor zullen corona-ontladingen vaker optreden bij mistig en regenachtig weer, maar ook bij helder droog weer zijn corona-ontladingen waargenomen [25]. Als een hoogspanningslijn op een hogere

spanning wordt gebruikt dan waarvoor hij is ontworpen, neemt de kans op corona-ontladingen ook toe [26]. Corona-ontladingen kunnen met UV-camera's worden vastgelegd.

Conclusie

Corona-ontladingen zijn een bekend verschijnsel en het mechanisme waardoor ze ontstaan is in kwalitatieve zin duidelijk. Over de kwantitatieve aspecten van corona-ontladingen bij bovengrondse hoogspanningslijnen is minder bekend. De vraag bij welk gedeelte van de hoogspanningslijnen corona-ontladingen kunnen optreden, kan op dit moment niet worden beantwoord. Ook de vraag onder welke atmosferische omstandigheden (gedurende welk gedeelte van het jaar) een bepaalde lijn corona-ionen in de atmosfeer zal brengen, kan alleen globaal worden beantwoord. In het algemeen wordt ervan uitgegaan dat door de eisen aan het ontwerp van een hoogspanningslijn het optreden van corona-ontladingen een zeldzaam verschijnsel is, dat alleen langs korte trajecten van het hoogspanningsnet optreedt, gedurende weersomstandigheden die slechts af en toe voorkomen. Bracken heeft gedurende twee jaar aan hoogspanningslijnen in de Verenigde Staten gemeten [27]. Hij vond verschillen in de sterkte van het elektrische veld tussen boven- en benedenwindse metingen (die op corona-ontladingen kunnen wijzen) gedurende 10-30% van de tijd. Henshaw is van mening dat corona-ontladingen wel een veel voorkomend verschijnsel zijn. In een gepubliceerde 'letter to the editor' van The American Journal of Epidemiology concludeerde hij dat alle hoogspanningslijnen waaraan hij heeft gemeten in meer of mindere mate corona-ionen produceren [28].

4.3 Overdracht van lading aan fijnstofdeeltjes

Inleiding

Als er een corona-ontlading heeft plaatsgevonden, zal een gedeelte van de corona-ionen terugvallen op de draden van de hoogspanningslijn en op de hoogspanningsmast. Een ander deel zal zich van de geleiders af bewegen. Deze beweging vindt plaats door diffusie, maar wordt in de buurt van de lijn versterkt door het elektrische veld. In het algemeen zijn de negatieve ionen en elektronen mobieler dan de positieve ionen. De corona-ionen zullen zich dichtbij de lijn, binnen 1 microseconde, hechten aan waterdamp en gassen, met een diameter rond de 1 nm [29, 30, 31]. Deze nano-ionen botsen met de fijnstofdeeltjes. Een gedeelte blijft als nanodeeltje bestaan. Een ander gedeelte hecht zich op een tijdschaal van 10-100 seconden aan de (grotere) fijnstofdeeltjes die daardoor extra lading krijgen [29, 21, 32]. Hoeveel lading de fijnstofdeeltjes krijgen, hangt af van het aantal ionen dat in de corona-ontlading wordt geproduceerd, de deeltjesgrootte van de fijnstofdeeltjes, de concentratie en ladings-toestand van de al aanwezige fijnstofdeeltjes en de atmosferische omstandigheden. Vooral het effect van de deeltjesgrootte is van belang. Hoe groter het deeltje, des te groter de trefkans voor de nano-ionen en hoe gemakkelijker het fijnstofdeeltje lading opneemt. Om een indicatie te geven: de kans dat een stofdeeltje van 1 μm een lading van 30 elementaire ladingen krijgt, is groter dan de kans dat een 0,02 μm deeltje één elementaire lading krijgt [28].

Lading per deeltje

Het proces van ladingsoverdracht van de corona-ionen op de fijnstofdeeltjes is niet volledig duidelijk. Een aantal onderzoekers heeft op basis van een vereenvoudigd diffusiemodel, schattingen gemaakt voor de gemiddelde hoeveelheid lading die per fijnstofdeeltje kan worden toegevoegd [2]. Henshaw en Few schatten voor een ionendichtheid van $2,5 \cdot 10^9$ per m^3 en een concentratie fijnstofdeeltjes van $15 \cdot 10^9$ per m^3 , dat 17% van de deeltjes met een diameter tussen 0,02 en 0,125 μm , lading krijgt³ [33]. Gemiddeld komt dat neer op 0,17 elementaire lading per deeltje. In thermisch evenwicht hebben

³ In veel onderzoeken worden deeltjes van deze grootte beoordeeld omdat deze grootte overeenkomt met de afmetingen van twee vervalproducten van radon.

dergelijke deeltjes een lading van $0,1e$ ($0,02 \mu\text{m}$ deeltjes) of van $0,7e$ ($0,125 \mu\text{m}$ deeltjes, zie Tabel 1). Recenter gaven Fews en Henshaw [29] aan dat 10-60% van de fijnstofdeeltjes met een diameter tussen de $0,1$ en $0,2 \mu\text{m}$ een lading van $1e$ krijgt. Bij één specifieke hoogspanningslijn kregen alle deeltjes van die grootte als er corona-ontladingen optreden een extra lading van minimaal $1e$ [29]. Jeffers [34] en Swanson en Jeffers [26] hebben de modelberekeningen van Fews en Henshaw uitgebreid en gedeeltelijk opnieuw uitgevoerd. In hun berekeningen hielden zij rekening met de afname in de oorspronkelijke ionendichtheid naarmate de corona pluim zich verder van de hoogspanningslijn verwijdert. Hun resultaten wezen in het algemeen op iets hogere extra lading op de fijnstofdeeltjes: $0,14e$ voor $0,02 \mu\text{m}$ deeltjes en $0,87e$ voor $0,125 \mu\text{m}$ deeltjes. Omdat de blootstellingsduur van de fijnstofdeeltjes aan de nano-ionen in werkelijkheid kort is zullen de werkelijke waarden volgens Swanson en Jeffers waarschijnlijk lager zijn. Uitgaande van een dichtheid van 10^9 ionen/ m^3 stelde Jeffers dat de blootstelling van $0,02 \mu\text{m}$ deeltjes aan de nano-ionen te kort is om ladingsverzadiging (elk deeltje met 1 elementaire lading) te bereiken [34]. Daaruit concludeerde hij dat de extra lading op fijnstofdeeltjes ($0,02$ en $0,125 \mu\text{m}$) onvoldoende is om gezondheidseffecten te kunnen induceren. De berekeningen van Jeffers bevatten echter aannames waarvan niet duidelijk is in hoeverre deze realistisch zijn. Allereerst is onduidelijk of een ionendichtheid van 10^9 ionen/ m^3 als ‘worst case’ schatting kan worden geïnterpreteerd. Vervolgens is de keuze van Jeffers voor een integratietijd van 20 s , gezien de stabiliteit van de nano-ionen en fijnstofdeeltjes, waarschijnlijk te kort. Ook voerde Jeffers de berekening alleen voor $0,02 \mu\text{m}$ deeltjes uit, die door hun kleine diameter relatief moeilijk worden opgeladen. Ten slotte legde Jeffers niet uit waarom alleen bij ladingsverzadiging gezondheidseffecten te verwachten zijn. In een recent artikel heeft Jeffers bij zijn modelberekeningen ook rekening gehouden met de lading die de fijnstofdeeltjes van nature in thermisch evenwicht al hebben [35]. Dit leidde tot een aanzienlijke reductie in de schatting voor de extra lading op de fijnstofdeeltjes: voor $0,01 \mu\text{m}$ deeltjes voegden corona-ontladingen gemiddeld $0,04e$ per deeltje toe aan de evenwichtslading van $0,22e$. Voor $0,1 \mu\text{m}$ deeltjes was dat $0,11e$ bij een evenwichtslading van $0,67e$. Bij zijn schattingen ging Jeffers uit van thermisch evenwicht. Deeltjes met kleine diameter blijken echter vaak niet het thermische evenwicht te bereiken [3.2.2].

Conclusie

Het opladen van fijnstofdeeltjes door de ionen die als gevolg van een corona-ontlading ontstaan, is niet volledig begrepen. Vereenvoudigde berekeningen met een diffusiemodel laten een relatief kleine oplading zien. Voor $0,1 \mu\text{m}$ deeltjes variëren de schattingen van de gemiddelde extra lading per fijnstofdeeltje van $0,1$ tot $0,9$ elementaire lading. Zonder aanwezigheid van een hoogspanningslijn hebben de $0,1 \mu\text{m}$ deeltjes (in thermisch evenwicht) een gemiddelde lading van $0,67$ elementaire lading.

4.4 Oscillatie fijnstofdeeltjes

De ionen die bij een corona-ontlading ontstaan, hechten zich aan nano-ionen die hun lading weer gedeeltelijk aan fijnstofdeeltjes kunnen overdragen. Deze geladen deeltjes zullen in de onmiddellijke nabijheid van de hoogspanningslijn (waar het elektrische veld sterk is) gaan oscilleren met een frequentie van 50 Hz . De amplitude van deze oscillatie hangt af van de sterkte van het elektrische veld, de lading op de deeltjes en de mobiliteit van de deeltjes. Deze mobiliteit hangt weer samen met de massa, omvang en vorm van de deeltjes. De elektrische veldsterkte direct onder een hoogspanningslijn bedraagt op 1 m hoogte ongeveer 5 kV/m . Het veld neemt snel af met de afstand tot ongeveer 100 V/m op 50 m uit het hart van de hoogspanningslijn [2]. Deze waarden gelden voor een niet-verstoord elektrisch veld. Geleidende objecten zullen het elektrische veld verstoren waardoor de elektrische veldsterkte aanzienlijk wordt verhoogd. Het menselijk lichaam kan als een geleidend object worden

beschouwd. Daarom zal de veldsterkte in de buurt van het lichaam verhoogd worden. Voor het hoofd bedraagt deze verhoging een factor 18 [2]. Hierdoor treden direct onder een hoogspanningslijn, dichtbij het hoofd veldsterktes op van 90 kV/m [2]. Bij deze veldsterkte oscilleren nanometerdeeltjes met een amplitude (top-top waarde) van ongeveer 7 cm. De amplitude van de oscillatie neemt snel af met de grootte van de deeltjes; voor een 0,2 μm deeltje bedraagt de amplitude van de oscillatie nog slecht 5 μm [36, 33]. Door de oscillatie wordt de trefkans van het geladen deeltje met een oppervlak of ander deeltje groter, wat tot een grotere depositie zou kunnen leiden. In een stilstaande grenslaag tussen atmosfeer en huid zal door extra depositie de concentratie van de betrokken deeltjes in de grenslaag afnemen, waardoor de extra depositie uiteindelijk beperkt blijft. Omdat het elektrische veld van een hoogspanningslijn binnenshuis wordt afgeschermd, zal oscillatie van geladen deeltjes alleen in de buitenlucht optreden. Om deze reden speelt oscillatie ook geen rol bij de depositie van ingeademde fijnstofdeeltjes. Het elektrische veld in het lichaam is daarvoor te laag, zelfs in de bovenste luchtwegen (mond en neus). Jeffers toonde aan dat het veld in het lichaam ruwweg een factor 10.000 lager is dan het externe veld [35].

Conclusie

Theoretische overwegingen en modelberekeningen laten zien dat geladen deeltjes in het (verstoorde) elektrische veld onder of dichtbij een bovengrondse hoogspanningslijn kunnen gaan oscilleren. Dit geldt vooral voor fijnstofdeeltjes met een diameter van enkele nanometers. Voor deze deeltjes wordt een hogere depositie op de huid verwacht. Binnenshuis zal dit effect, vanwege afscherming van het elektrische veld niet optreden.

4.5 Verspreiding in de atmosfeer

Inleiding

De fijnstofdeeltjes met extra lading worden door de wind van de hoogspanningslijn weggevoerd. Op deze manier ontstaan 'wolken' geladen deeltjes die door de wind mee worden genomen. Aanvankelijk werden uitsluitend negatief geladen wolken waargenomen [19]. Onder bepaalde omstandigheden kunnen ook positief geladen wolken ontstaan. Uiteindelijk zullen de fijnstofdeeltjes hun extra lading verliezen en wordt het thermische evenwicht hersteld. Dit proces van neutralisatie van de extra lading op de fijnstofdeeltjes duurt typisch tussen de 3 en 30 minuten [29, 37]. Soms worden na 50 of 60 minuten nog extra geladen fijnstofdeeltjes gevonden [19, 38]. De gemiddelde windsnelheid in Nederland varieert van 4 m/s aan de oostgrens tot ruim 6 m/s aan de kust. Bij dergelijke windsnelheden kunnen wolken geladen deeltjes zich over grote afstanden verplaatsen. Deze verspreiding is experimenteel aangetoond, indirect door de verstoring van het natuurlijke elektrische veld op leefniveau door deze geladen fijnstofdeeltjes te meten of meer direct door het aantal geladen deeltjes boven- en benedenwinds van een hoogspanningslijn waar corona-ontladingen optreden, te meten en te vergelijken.

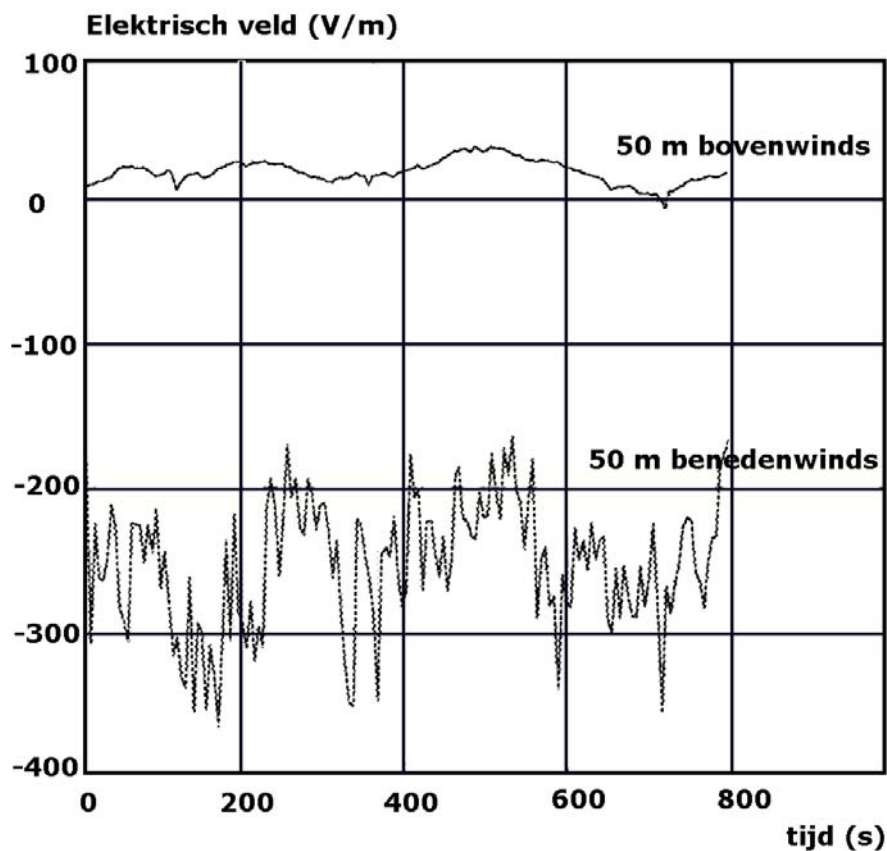
Verstoring van het natuurlijke elektrische veld van de aarde

Door kosmische straling, UV-straling en onweer opgewekte elektrische verschijnselen in de atmosfeer induceren een negatieve lading op het aardoppervlak, waardoor de atmosfeer positief geladen achterblijft. Een typische ruimtelading is + 10 pC/m³ ofwel $6,25 \cdot 10^7$ elementaire ladingen per m³. Deze ruimtelading leidt tot een statisch elektrisch veld van -100 V/m op leefniveau (neerwaarts gericht). Dit 'natuurlijke' elektrische veld is gevoelig voor weersomstandigheden, bewolking en geladen deeltjes. Een wolk geladen deeltjes die van een bovengrondse hoogspanningslijn afkomt, zal het natuurlijke elektrische veld verstoren. Een wolk met positieve lading zal het natuurlijke elektrische veld vergroten, de richting blijft neerwaarts. Een negatieve ladingswolk reduceert het natuurlijke elektrische veld en

kan bij voldoende (negatieve) lading in de wolk de richting van het elektrische veld doen omkeren. Voor een platte wolk van 1 m dikte is een ladingsdichtheid van $5,5 \cdot 10^9$ negatieve ionen/m³ voldoende om het elektrische veld van -100 V/m te compenseren [2].

Metingen aan het elektrische veld

De eerste metingen aan het elektrische veld op leefniveau werden al in 1952 gedaan in de buurt van 66 en 132 kV (AC) hoogspanningslijnen[19]. Onder mistige en nevelige condities was op enkele kilometers afstand een verlaging van het elektrische veld meetbaar met maximaal 800 V/m. Bij mooi weer werd een kleinere of geen verlaging van de elektrische veldsterkte gemeten. Vergelijkbare observaties werden gedaan door Mühleisen [39]. In een uitgebreide meetreeks aan een 400 kV DC hoogspanningslijn in de Verenigde Staten is emissie van corona-ionen duidelijk aangetoond [20]. Het effect was tot op 1600 m afstand van de hoogspanningslijn meetbaar. Dichtbij deze hoogspanningslijn werden elke seconde typisch ongeveer $20-40 \cdot 10^9$ ionen/m³ gevormd. Jones and Hutchinson [40] plaatsten een puntbron van corona-ionen op een paar meter boven de grond en bepaalden het elektrische veld en de ruimtelading benedenwinds. Op tientallen meters afstand werden veranderingen in het elektrische veld van ongeveer 1000 V/m gemeten. Fews et al. [21, 29] hebben een uitgebreide serie metingen gedaan in het Verenigd Koninkrijk, onder allerlei weersomstandigheden. De temperatuur varieerde tussen 16 en 21 °C, de relatieve luchtvochtigheid tussen 37 en 70% en de windsnelheid van minder dan 0,5 m/s tot 5,7 m/s. De metingen toonden onder vrijwel alle omstandigheden verstoring van het elektrische veld aan. In het onderzoek uit 1999 was het elektrische veld duidelijk verstoord tot aan de grens van het meetgebied op 500 m afstand van het hart van de hoogspanningslijn [56]. Fews en Henshaw namen een duidelijk verhoogd veld waar tot op 300 meter van de hoogspanningslijn [29]. Bij één meting op 7 km afstand van de hoogspanningslijn werd nog een duidelijke verhoging van het elektrische veld waargenomen [29]. Figuur 8 geeft een voorbeeld van een meting op 50 meter ter weerszijden van de hoogspanningslijn bij Latheridge Green, Gloucester (UK) op 8 september 1999. Het verschil in het elektrische veld tussen de benedenwindse en bovenwindse locatie bedraagt ongeveer 250 V/m.



Figuur 8 Meting van het elektrische veld aan het aardoppervlak boven- en benedenwinds van een bovengrondse 400 kV hoogspanningslijn (bron: Fews et al [29])

Met behulp van modelberekeningen op basis van de waargenomen verstoring van het elektrische veld berekende Fews de ionendichtheid die voor een dergelijke verstoring nodig is. De schattingen varieerden tussen $0,2 \cdot 10^9$ en $7,5 \cdot 10^9$ ionen/m³ (gemiddelde van ongeveer $3 \cdot 10^9$ ionen/m³). Bracken heeft in de Verenigde Staten gedurende twee jaar op vier posities de verstoring van het elektrische veld en de ionenconcentraties gemeten in de buurt van drie parallelle (AC) hoogspanningslijnen, twee van 230 kV en één van 450 kV [27]. De afstanden van de meetstations tot de hoogspanningslijnen varieerden tussen 20 en 80 meter. Zijn metingen zijn consistent met de resultaten van Fews [21, 29]. Hij registreerde duidelijke verschillen in de elektrische veldsterkte tussen bovenwindse en benedenwindse meetstations tot 1000 V/m. Er is vrijwel altijd sprake van een surplus aan positieve lading. Gedurende ruwweg 10-30% van de tijd was er een duidelijk verschil in veldsterkte tussen boven- en benedenwindse locaties. Dit zou er op kunnen wijzen dat die hoogspanningslijnen gedurende 10-30% van het jaar corona-ionen produceren.

Directe meting ionenconcentraties

Meting van de verstoring van het elektrische veld is een indirecte manier om de hoeveelheid extra geladen deeltjes in te schatten. Volgens Swanson en Jeffers is het beter van directe en gelijktijdige metingen van de concentraties van zowel de positieve als de negatieve ionen uit te gaan [41]. Zij presenteerden meetresultaten voor de ionenconcentratie bij een bovengrondse hoogspanningslijn onder droge atmosferische omstandigheden. In het algemeen was er een overschot aan positieve ionen met

een concentratie van ongeveer $5 \cdot 10^8$ ionen/m³ (piekwaarde 10^9 ionen/m³) [26]. Voor een 400 kV hoogspanningslijn waar veelvuldig corona-ontladingen optreden (Chobham), werden benedenwinds op 50 m afstand tot $5 \cdot 10^9$ (positieve) ionen/m³ waargenomen. Grabarczyk toonde ook aan dat in de buurt van 400 kV en 110 kV lijnen de lading van fijnstofdeeltjes wordt beïnvloed [42]. Tot op 100 meter van het hart van de lijn was de ladingsdichtheid van positieve lading benedenwinds bijna 4 keer zo hoog als bovenwinds. Tussen 100 en 300 meter nam het de concentratie positieve ionen sneller af dan die van de negatieve ionen en uiteindelijk gingen de negatieve ionen overheersen. De ionenconcentraties die door Bracken zijn gemeten, zijn consistent met die voor de verstoring van het elektrische veld [27]. Voor ongeveer 10-30% van de metingen werden benedenwinds hogere concentraties van positieve ionen waargenomen. De verschillen konden op 80 m van de hoogspanningslijn oplopen tot circa $3 \cdot 10^9$ ionen/m³. Tevens bepaalde Bracken de jaargemiddelde concentratie van fijnstofdeeltjes. Op de landelijke locatie bedroeg die ongeveer $5,5 \cdot 10^9$ deeltjes/m³, op de voorstedelijke locatie circa $14,5 \cdot 10^9$ deeltjes/m³. Ten slotte gaf Bracken aan dat, als er corona-ontladingen optreden, ruwweg 30% van de fijnstofdeeltjes daardoor opgeladen werd.

Binnenshuis versus buitenshuis

Het schatten van de invloed van corona-ionen op de lading van de fijnstofdeeltjes binnenshuis is gecompliceerder dan buitenshuis. Fijn stof kan de woning binnen komen door open ramen en deuren, door kieren en spleten en via het ventilatiesysteem van de woning. Bij binnendringen door open ramen en deuren zullen de eigenschappen van het opgeladen fijn stof niet worden gewijzigd. Bij binnendringen door naden en kieren zullen vooral de geladen fijnstofdeeltjes door elektrostatische krachten deponeren. De gemiddelde lading op de fijnstofdeeltjes binnen zal hierdoor lager worden. Ook de grotere deeltjes zullen minder gemakkelijk binnen komen. Als de buitenlucht door een ventilatiesysteem wordt aangezogen zal het fijn stof ingrijpend worden beïnvloed. Door wrijving en het toepassen van filters zal er weinig of geen correlatie meer bestaan tussen de oorspronkelijke eigenschappen van het fijn stof buiten en binnen. Dit geldt voor de grootteverdeling en voor de ladingsverdeling van de deeltjes. Een extra complicatie is dat de fijnstofconcentraties in binnenlucht als gevolg van roken, verwarming en ophoping van radon, meestal groter zijn dan buiten. Het belang van de geladen fijnstofdeeltjes afkomstige van corona-ontladingen zal daardoor binnen afnemen. Samengevat komt het er op neer dat de extra lading die fijnstofdeeltjes door corona-ontladingen kunnen krijgen bij de overgang van buiten naar binnen in belang zal afnemen. Omdat mensen zich in West-Europa veel vaker binnen bevinden dan buiten, betekent dit een reductie van de blootstelling aan extra geladen fijnstofdeeltjes.

Conclusie

Corona-ontladingen kunnen leiden tot 'wolken' geladen deeltjes die door de wind tot ver van de hoogspanningslijnen worden getransporteerd. Deze wolken zijn in verschillende onderzoeken aangetoond, direct door meting van het aantal geladen deeltjes of indirect door het meten van de verandering van het natuurlijke elektrische veld. De meeste onderzoekers vinden een overschot aan positieve deeltjes, met een typische concentratie van $3 \cdot 10^9$ ionen/m³. Binnenshuis zal de gemiddelde lading op fijnstofdeeltjes ten gevolge van corona-ionen lager zijn dan buitenshuis. De ladingswolken worden tot op enkele honderden meters afstand benedenwinds van de hoogspanningslijnen waargenomen. In uitzonderingsgevallen is de invloed van de corona-ontladingen op het elektrische veld tot op kilometers van de hoogspanningslijn meetbaar.

4.6 Depositie van (geladen) fijnstofdeeltjes in luchtwegen en longen

Inleiding

De depositie van fijnstofdeeltjes wordt in eerste instantie bepaald door de grootte van de deeltjes (zie Figuur 5). De zeer kleine en de grote deeltjes (onder $0,1 \mu\text{m}$ of boven $1 \mu\text{m}$) worden efficiënt in de neus afgevangen. Van deze deeltjes komen er zeer weinig in de diepere luchtwegen en de longen terecht. Als de grote of kleine deeltjes toch de longen bereiken, deponeren ze vrijwel volledig. Voor fijnstofdeeltjes van deze grootte zijn er dus zeer weinig mogelijkheden om de depositie in longen of luchtwegen door extra lading op de deeltjes te verhogen. Als er al een effect van lading zou zijn, dan werkt dat verlagend op depositie in de longen, omdat de extra geladen deeltjes door het neusslijmvlies extra worden aangetrokken en meer neerslaan. Anders is de situatie voor fijnstofdeeltjes met een diameter tussen $0,1$ en $1 \mu\text{m}$. Deze deeltjes dringen gemakkelijk door in de diepere luchtwegen en in de longen en longblaasjes, maar de depositie van deeltjes met deze grootte is gering. De meeste deeltjes worden gewoon weer uitgeademd. De laagste depositie diep in de longen bedraagt $8,5\%$ voor deeltjes van $0,4 \mu\text{m}$ [2]. Voor deeltjes tussen $0,1$ en $1 \mu\text{m}$ is er daarom veel ruimte om de depositie in diepere luchtwegen en longen te verhogen. Als de lading op fijnstofdeeltjes de depositie in de longen beïnvloedt, zal het vooral om deeltjes van deze grootte gaan.

Lading en depositie

Lading kan op twee manieren de depositie van fijnstofdeeltjes beïnvloeden. Allereerst doordat deeltjes met gelijksoortige lading elkaar onderling afstoten. Hierdoor botsen meer deeltjes tegen de wand van luchtwegen en longen en zullen blijven plakken. Dit effect treedt alleen op bij hoge deeltjesconcentraties. Onder normale atmosferische omstandigheden leidt dit effect niet tot verhoogde depositie [2]. Een tweede effect ontstaat doordat een geladen deeltje bij een geleidend oppervlak, zoals de wand van de longblaasjes, een elektrostatische aantrekkingskracht ondervindt. De grootte van de aantrekkende kracht is gelijk aan de aantrekkingskracht van een even grote, tegengestelde lading die even ver achter het geleidende oppervlak ligt, de zogenaamde beeldlading. Gezien de lage depositie onder normale atmosferische omstandigheden van deeltjes tussen $0,1$ en $1 \mu\text{m}$ zou extra lading op deze manier tot extra depositie in de longen kunnen leiden. Onderzoek naar het effect van lading op depositie in de luchtwegen en longen loopt al enkele decennia (zie Cohen et al. [43] voor een overzicht). Hieronder wordt ingegaan op het onderzoek dat is uitgevoerd met vrijwilligers en met proefdieren, theoretisch onderzoek en experimenteel onderzoek met een metalen mal van de bovenste luchtwegen.

Vrijwilligers

Bij een onderzoek naar depositie in de neus werd geen verandering gevonden bij een verlaging van de lading op polystyreen aerosolen ($2-9 \mu\text{m}$) van $20-50e$ naar $3-12e$ [44]. Melandri et al. [45] toonden aan dat de depositie van wasdeeltjes tussen $0,3$ en $1,1 \mu\text{m}$ met een factor $15-30$ toenam als de wasdeeltjes opgeladen werden met $30e$ tot $110e$ per wasdeeltje. Dit onderzoek bevestigde ook dat de verhoging van depositie vooral door elektrostatische krachten wordt bepaald en niet door de deeltjesconcentratie. Een tweede onderzoek concretiseerde de hoeveelheid extra lading die nodig is om de depositie te verhogen [46]. Voor deeltjes van $0,3 \mu\text{m}$ bleek minimaal een extra lading van $9e$ nodig. Voor deeltjes van $0,6$ en $1 \mu\text{m}$ was dat minimaal $20e$. Met dezelfde methodiek toonden Prodi en Mularoni aan dat de extra depositie alleen afhangt van elektrostatische krachten en niet van de individuele vrijwilliger of van de deeltjesconcentratie [47]. In dat onderzoek bleek ook een extra lading van minimaal $9e$ nodig om de depositie te verhogen voor deeltjes van $0,3-1,0 \mu\text{m}$.

Proefdieren

Proefdieronderzoek aan konijnen, ratten en muizen ondersteunt de resultaten die gevonden zijn met vrijwilligers. De onderzochte ‘fijnstofdeeltjes’ lopen sterk uiteen, van kobalt tot asbestvezels, maar in alle situaties werd een hogere depositie in de longen gevonden als de lading van de deeltjes hoger wordt. De in de experimenten toegepaste ladingsverhoging was substantieel, variërend van 8e tot 1000e [43].

Theoretisch onderzoek

Er zijn ook theoretische onderzoeken naar de invloed van lading van fijnstofdeeltjes op depositie in de luchtwegen uitgevoerd [48, 49, 2]. Yu berekende de minimale extra lading die nodig is om de depositie van fijnstofdeeltjes te verhogen. Voor deeltjes van 0,3 en 1 μm was er volgens zijn berekeningen tussen de 10e en 50e aan extra lading per deeltje nodig [48]. Volgens Bailey et al. [49] is de lading van fijnstofdeeltjes onder normale atmosferische omstandigheden te laag om depositie te beïnvloeden. Door de lading te verhogen kan de depositie worden verhoogd. De grootte van de ladingstoename kan worden gebruikt om de deeltjes in een bepaald gebied van de diepere luchtwegen of longen te laten deponeren. Ook in dit onderzoek zijn ladingsverhogingen met enkele tientallen keren de elementaire lading nodig.

Experimenteel onderzoek aan een metalen mal van luchtwegen

Er is experimenteel onderzoek gedaan naar depositie van geladen deeltjes in een metalen mal van de bovenste luchtwegen [50, 51, 43, 52]. Deze mal wordt gemaakt op basis van longen afkomstig van een autopsie. Een dergelijke mal bevat de luchtpijp, hoofdbronchiën en een aantal vertakkingen tot trachea met een diameter van ongeveer 3 mm. Lucht stroomt door de mal en de depositie in de ‘luchtwegen’ wordt bepaald uit de verschillen in fijnstofdeeltjes in de in- en uitstromende lucht. Chan [50] vond een verhoogde depositie van 2-7 μm deeltjes bij extra ladingen tussen 360e en 1100e. Deze waarden zijn waarschijnlijk zo hoog omdat de wanden van zijn mal bestaan uit niet-geleidend plastic met een oliefilm [43]. In de twee recentste onderzoeken op dit gebied gebruikten Cohen et al. een goed geleidende mal gemaakt van een metaallegering [51, 52]. Zij vonden een duidelijke verhoging van de depositie in de luchtwegmal voor de ultrafijne deeltjes met een relatief kleine extra lading van 1e. Voor 0,05 μm deeltjes bedroeg de verhoging (ten opzichte van ongeladen deeltjes) ruim een factor 5, voor 0,125 μm deeltjes een factor 6. Het model van de luchtwegen dat Cohen et al. gebruikten, vormt geen realistische benadering van het ademhalingsstelsel. Daarom kunnen deze resultaten niet zonder meer naar effecten op de mens worden vertaald. Cohen et al. merkten zelf op dat daarvoor nog een aantal cruciale verbeteringen nodig zijn. Allereerst zou zijn ‘doorstroombodem’ moeten worden veranderd in een model waar de lucht instroomt, tot stilstand komt en weer uitstroomt. Daarnaast zou de stroomsnelheid van de lucht tijdens in- en uitstromen hoger moeten worden. Ook zouden vochtigheid en temperatuur van de lucht beter bij de werkelijke situatie moeten aansluiten.

Schattingen voor de extra depositie

Hoe groot de extra depositie in de longen in de buurt van bovengrondse hoogspanningslijnen zou kunnen zijn, is op dit moment niet in te schatten. De meeste onderzoeken gebruikten veel grotere ladingstoevoegingen dan op grond van corona-ontladingen verwacht mogen worden en de gegevens van Cohen kunnen niet voor het schatten van effecten op de mens worden gebruikt [52]. Ten slotte zou voor een goede schatting nauwkeurige informatie over de grootte en ladingsverdeling van de fijnstofdeeltjes nodig zijn.

Ondanks deze ontbrekende informatie leidden Henshaw en Few uit de gegevens van Cohen toch een kwantitatieve schatting af voor effecten in de mens [33, 2]. Zij postuleerden een toename van depositie in de longen als gevolg van corona-ontladingen tussen 20% en 60%, benedenwinds van een

hoogspanningslijn vergeleken met bovenwinds. Naar oordeel van het RIVM kunnen de resultaten van Cohen niet gebruikt worden voor een realistische schatting voor effecten bij mensen (zie hierboven). De schatting van 20-60% extra depositie in de longen van omwonenden van hoogspanningslijnen heeft daarom een speculatief karakter.

De NRPB [2] belichtte de depositie nog uit een andere invalshoek. Op grond van de deeltjesgrootte waarbij depositie het laagste is, werd een theoretisch maximum voor de depositieverhoging berekend. Dit leverde een geschatte maximale depositieverhoging in de longen met een factor 12 (op grond van een minimale depositie van 8,5% bij 0,4 μm). Voor deeltjes tussen 0,1 en 1 μm gaf NRPB aan dat de potentiële verhoging een factor 3-10 bedraagt (zie bijvoorbeeld Figuur 12 in [2]). De NRPB merkte zelf op dat deze waarde moet worden gezien als een theoretisch, niet realistisch maximum. Door allerlei factoren (deeltjes met andere grootte, geen depositieverhoging door extra lading op deeltjes boven de 0,3 μm) kan een dergelijk hoge factor in de praktijk nooit worden gehaald. De theoretische beschouwing van de NRPB, die niet door metingen bij mensen worden ondersteund, is naar inschatting van het RIVM niet geschikt voor een realistische schatting van de extra depositie in longen van omwonenden van een bovengrondse hoogspanningslijn.

Inhalatiemodellen

De gebruikelijke inhalatiemodellen zoals het ICRP-model en het MPPD bieden geen mogelijkheid om de extra depositie door toevoegen van lading te schatten. De lading van de fijnstofdeeltjes is geen apart te variëren parameter in deze modellen. Uitbreiden van deze modellen met ladingseffecten op depositie van fijnstofdeeltjes is een onderzoeksproject op zich. In principe is het mogelijk de invloed van extra geladen fijnstofdeeltjes met een relatief kleine extra lading op de depositie in de longen bij vrijwilligers te meten. Dergelijke technisch en organisatorisch ingewikkelde onderzoeken zijn niet in de wetenschappelijke literatuur gepubliceerd. Keitch presenteerde in 2004 een ontwerp voor een 'mechanische long' die in staat zou zijn 'longdepositie' in de buurt van hoogspanningslijnen beneden- en bovenwinds direct te meten [53]. De mechanische long wordt nog steeds verder ontwikkeld, maar wetenschappelijke publicaties zijn nog niet verschenen [54]. Paul Keitch is in een e-mail benaderd voor extra informatie. Hij antwoordde dat de mechanische long nog steeds verder ontwikkeld wordt. Een ingestuurd artikel met depositiemetingen is afgewezen en wordt op dit moment, aan de hand van de opmerkingen van de referenten, herschreven [54].

Conclusies

Als er meer dan tien elementaire ladingen extra op de fijnstofdeeltjes van 0,3-1 μm wordt gebracht, is in vrijwilligers en proefdieren aangetoond dat de longdepositie toeneemt. Bij geringere ladingstoevoegingen werd voor deeltjes van die grootte geen verhoogde depositie gemeten. Omdat de waargenomen ladingsverhoging door corona-ontladingen relatief klein is (de gemiddelde extra lading per deeltje varieert van 0,1 tot 0,9 elementaire lading), is het optreden van extra depositie van fijnstofdeeltjes (diameter rond 0,1 μm) als gevolg van corona-ontladingen in de buurt van een hoogspanningslijn op dit moment niet aannemelijk gemaakt. Een betrouwbare kwantitatieve schatting voor de verhoging van de depositie is op dit moment niet mogelijk. De depositie in de longen van grotere deeltjes (diameter boven 0,3 μm) of kleinere deeltjes (diameter onder 0,1 μm) wordt vrijwel zeker niet door corona-ontladingen beïnvloed.

4.7 Depositie van (geladen) fijnstofdeeltjes op de huid

4.7.1 Ladingseffecten dichtbij een hoogspanningslijn

Inleiding

Geladen fijnstofdeeltjes met een diameter onder $0,05 \mu\text{m}$ kunnen in het elektrische veld onder een hoogspanningslijn met een amplitude van enkele centimeters gaan oscilleren [4.4]. Dat betekent dat voor deze deeltjes, buitenshuis, extra depositie door oscillatie direct onder een bovengrondse hoogspanningslijn op theoretische gronden mogelijk is.

Ongebonden radonochters

Onderzoek naar depositie van kleine fijnstofdeeltjes richt zich vooral op (ongebonden) vervalproducten van radon omdat deze kleiner zijn dan $0,05 \mu\text{m}$ en omdat extra depositie meer radioactiviteit op de huid kan brengen. Omdat de radonconcentratie buitenshuis lager is dan binnenshuis en mensen in Noordwest Europa het overgrote deel van hun tijd binnen doorbrengen, is het de vraag of deze extra depositie gevolgen heeft voor de gezondheid [55]. Fews schatte op basis van niet gepubliceerde metingen dat voor iemand die 10% van de tijd buitenshuis direct onder een hoogspanningslijn verblijft de dosis op de basale laag van de gezichtshuid 1,2 - 2 keer zo hoog is ten gevolge van straling afkomstig van polonium-214 en polonium-218 [56]. Hij zag een mogelijk verband met huidkanker omdat de α -deeltjes afkomstig van polonium-214 de basale laag van de huid, waar bepaalde huidtumoren hun oorsprong vinden, kunnen bereiken [17]. Op grond van deze waarden schatte Henshaw een 20% hoger risico op huidkanker binnen een strook van 25 m ter weerszijden van een bovengrondse hoogspanningslijn. Dit onderzoek [56] is sterk bekritiseerd. McLaughlin and Gath hebben de activiteit van radonochters in de buurt van een 400 kV hoogspanningslijn gemeten, zowel in lucht als in depositie [57]. Zij vonden geen effect van de afstand tot de hoogspanningslijn op de totale gedeponeerde radioactiviteit van radonochters. Een opvallende bevinding van McLaughlin is dat de radioactiviteit van polonium-210 op een glazen hoogspanningsisolator van 36 jaar oud verhoogd was op het gedeelte dat in contact had gestaan met de buitenlucht. Dit wijst juist op het wegvangen van radonochters door de hoogspanningslijn. Ook Miles en Algar hebben de concentratie van radonochters direct onder een 400 kV hoogspanningslijn en op 60 m afstand gemeten [58]. Zij vonden geen verschil tussen de beide meetlocaties, maar de cruciale factor depositie is in hun onderzoek niet gemeten.

Andere fijnstofbestanddelen

Chemische verontreiniging bestaat vrijwel uitsluitend uit deeltjes groter dan $0,05 \mu\text{m}$. De depositie van die deeltjes op de huid zal nauwelijks door het elektrische veld van de hoogspanningslijn worden beïnvloed. Ook in de bovenste luchtwegen zal depositie nauwelijks door oscillatie worden beïnvloed [2]. Het elektrische veld in het lichaam is daarvoor te laag, ruwweg een factor 10.000 lager dan het externe veld [36, 59]⁴.

Fews [56] gaat er als enige van uit dat oscillatie ook voor grotere deeltjes belangrijk is. Hij gaf aan dat als turbulentie in de grenslaag lucht-huid en de lokale verstoring van het elektrische veld in de berekening worden meegenomen, er een significant verhoogde depositie is van fijnstofdeeltjes tussen $0,001$ en $10 \mu\text{m}$. De modelberekeningen waaruit hij dit afleidde, werden ondersteund door meting van verhoogde depositie op geaarde, gladde metalen bollen van 20 cm diameter. Voor aan aerosolen gekoppeld polonium-218 bedroeg de extra depositie onder een 400 kV lijn een factor 2-2,9. Voor

⁴ Ondanks de zeer lage elektrische veldsterkte in de bovenste luchtwegen acht Henshaw extra depositie toch mogelijk.

aerosolen met polonium-214 is de extra depositie onder een 275 kV lijn 1,4 keer zo hoog. De depositie van gebonden polonium-214 onder een 132 kV lijn was niet significant verhoogd.

Het hiervoor genoemde artikel van Fews is van veel kanten bekritiseerd. Swanson en Jeffers [60, 26] vinden de waarden van de parameters die Fews in zijn modellering gebruikt onrealistisch. In hun visie is de berekening voor de ultrafijne fractie in orde, maar voor de grotere deeltjes niet. Dit komt omdat voor de grotere deeltjes de beweging ten gevolge van turbulentie belangrijker is dan de oscillaties met zeer kleine amplitude in het elektrische veld. Daarnaast hebben Swanson en Jeffers kritiek op het gladde oppervlak van de bollen dat qua textuur niet met de menselijke huid overeenkomt. Ondanks deze kritiekpunten gaat de NRPB [2] ervan uit dat de luchtstroom rond de gebruikte bollen grofweg vergelijkbaar is met die rond een hoofd.

In een recent onderzoek heeft Jeffers de berekeningen van Fews [61] nogmaals geëvalueerd. Hij toonde met modelberekeningen aan dat de door Fews gevonden extra depositie voor alle deeltjesgroottes een artefact is. Dit artefact ontstond doordat Fews uitgaat van isotherme bollen op omgevingstemperatuur. Als in het model wordt ingebouwd dat de huid meestal aanzienlijk warmer is dan de omgeving, verdwijnt de verhoogde depositie voor grotere deeltjes. Ook in dit artikel benadrukte Jeffers nog eens dat berekeningen aan gladde bollen weinig voorspellende waarde voor levende huid hebben.

Conclusie

Modelberekeningen voorspellen extra depositie van geladen fijnstofdeeltjes ($< 0,05 \mu\text{m}$) op de huid. Door een verhoogde depositie van radondochters zou meer radioactiviteit op de huid kunnen komen. Metingen van depositie spreken elkaar tegen. Fews meet verhoogde deposities op metalen bollen. Andere auteurs vinden geen verhoogde depositie van radondochters op de huid in de buurt van een hoogspanningslijn. Ook over mogelijke gezondheidseffecten bestaat geen consensus. Fews gaat uit van een verhoging van het risico op huidkanker. Andere onderzoekers niet, allereerst omdat ze geen verhoogde depositie vinden of omdat de extra dosis ten opzichte van die door blootstelling aan radonvervalproducten binnenshuis, als zeer laag wordt beoordeeld. Op dit moment is extra depositie door opladen van fijnstofdeeltjes op de huid of een verhoogd risico op huidkanker direct onder een hoogspanningslijn niet aannemelijk.

4.7.2 Ladingseffecten op grotere afstand

Op grotere afstand van een hoogspanningslijn valt de invloed van het elektrische veld weg en zullen de fijnstofdeeltjes niet oscilleren. Eventuele extra depositie op de huid kan dan alleen worden veroorzaakt door de extra lading op de fijnstofdeeltjes. Onder veel omstandigheden (voldoende vocht, geen statische oplading) kan de huid als een geaarde geleider worden beschouwd die de geladen deeltjes aantrekt. Omdat de extra lading op de fijnstofdeeltjes klein is (zie paragraaf 4.3), zal de elektrostatiche aantrekkingskracht tussen huid en fijnstofdeeltje ook relatief klein zijn. Vanwege de grotere traagheid van de grote deeltjes zullen het vooral kleine fijnstofdeeltje zijn die extra zouden kunnen deponeren. In de buitenlucht moet de verplaatsing van de fijnstofdeeltjes door de elektrostatiche aantrekkingskracht concurreren met de verplaatsing door de wind. Miles [62] toonde aan dat wind op zichzelf, afgezien van ladingseffecten, een sterke invloed heeft op depositie op de huid. In lucht die beweegt met een windsnelheid van 1 m/s neemt de depositie van radondochters op de huid toe met een factor twee tot acht, vergeleken met stilstaande lucht. Windsnelheden onder de 1 m/s komen slechts weinig voor. Feitelijk zal de radondepositie als gevolg van de wind buitenshuis de extra radondepositie ten gevolge van lading overheersen.

Conclusie

Op grotere afstand van een hoogspanningslijn zal een kleine extra lading op fijnstofdeeltjes (circa 1e) zeer waarschijnlijk niet tot extra depositie op de huid leiden.

4.8 Epidemiologisch onderzoek

Inleiding

Er is uitgebreid gezondheidsonderzoek gedaan naar mensen die blootgesteld worden aan elektromagnetische velden in de buurt van hoogspanningslijnen, door het gebruik van elektrische apparaten of in arbeidssituaties. In de onderzoeken bij bovengrondse hoogspanningslijnen is ontwerp en uitvoering er op gericht de invloed van magnetische of elektrische velden op de gezondheid te evalueren. Meestal wordt een groep mensen die binnen een bepaalde afstand van de hoogspanningslijn (of boven een bepaalde sterkte van het elektrische of magnetische veld) woont, vergeleken met een controlegroep ver van de hoogspanningslijn, buiten de invloed van de magnetische en elektrische velden. Deze epidemiologische onderzoeken worden hier 'algemene onderzoeken' genoemd. Met betrekking tot fijn stof zijn deze onderzoeken geschikt om uitspraken te doen over gezondheidseffecten dichtbij hoogspanningslijnen die door oscillatie van geladen deeltjes zouden kunnen ontstaan. Voor uitspraken over mogelijke effecten van extra lading op door de wind meegevoerd fijnstofdeeltjes op de gezondheid zijn deze 'algemene onderzoeken' veel minder geschikt. Daarvoor zou een groep mensen die (bij de overheersende windrichting) benedenwinds van de hoogspanningslijn woont vergeleken moeten worden met een groep die bovenwinds woont. Dit laatste type onderzoek noemen we hier 'windrichtingspecifieke onderzoeken'. Dit onderzoek is natuurlijk alleen zinvol als er in een bepaald gebied inderdaad een duidelijke voorkeursrichting voor de wind is. Op dit moment zijn er tientallen 'algemene onderzoeken' gepubliceerd, maar zijn er geen 'windrichtingspecifieke onderzoeken' gepubliceerd. Door hun ontwerp hebben de algemene onderzoeken veel minder onderscheidend vermogen om effecten van geladen fijn stof aan te tonen. Anders gezegd: eventuele gezondheidseffecten van extra geladen fijn stof kunnen door dit type onderzoek niet worden aangetoond.

Algemene onderzoeken

De epidemiologische onderzoeken op het gebied van elektromagnetische velden en gezondheid zijn in 2002 geëvalueerd door het 'International Agency For Research on Cancer' [63]. In juni 2007 is deze evaluatie door de World Health Organisation (WHO) geactualiseerd [3]. Een breed scala aan mogelijke gezondheidseffecten is beoordeeld: depressie, zelfmoord, ziekte van Alzheimer, ziekte van Parkinson, amyotrofische lateraal sclerose, cardiovasculaire aandoeningen, verstoorde embryonale ontwikkeling en kanker. Met betrekking tot kanker gaat het in de buurt van hoogspanningslijnen vooral om leukemie, borstkanker en hersentumoren, maar ook andere vormen van kanker, waaronder huidkanker worden meegenomen. De WHO bevestigt de eerder gevonden associatie tussen magnetische velden bij bovengrondse hoogspanningslijnen en leukemie bij kinderen. Een oorzakelijk verband is, ook in deze evaluatie, niet aangetoond. Voor de bevolking wordt voor geen van de andere ziektes en aandoeningen een verband gevonden met de aanwezigheid van bovengrondse hoogspanningslijnen. Dat betekent dat er voor ziektes die mogelijk verband houden met blootstelling aan (extra geladen) fijnstofdeeltjes zoals huidkanker, hart- en vaatziekten, luchtwegaandoeningen en longkanker geen epidemiologische onderbouwing is.

Windrichting specifieke onderzoeken

Om een betrouwbare uitspraak te kunnen doen over gezondheidseffecten van door wind meegevoerd fijn stof is specifiek epidemiologisch onderzoek nodig. Een eerste aanzet is gegeven in het onderzoek van Draper [64]. Hij verdeelde de totale groep van kinderen die leukemie hebben gekregen op basis

van de overheersende zuidwestenwind in een benedenwindse en bovenwindse groep. Voor deze classificatie gebruikte hij een door Preece aangeraden methode [64]. Draper vond geen hoger risico op leukemie in de benedenwindse groep kinderen vergeleken met de bovenwindse.

Preece heeft in 2001 de voorlopige resultaten van een windrichting specifiek onderzoek gepresenteerd [65]. Van elk adres in de regio Avon waar een geval van kanker is geregistreerd, werd bepaald of het binnen 400 meter benedenwinds van een bovengrondse hoogspanningslijn ligt⁵. Als dat niet het geval was, werd het adres ingedeeld in de bovenwindse groep. Preece beschouwde in het pilot-onderzoek gevallen van kanker van de mond, luchtwegen, maag en darm. Hij vond een significant verhoogd risico op kanker van mond en luchtwegen in de benedenwindse groep. Het risico op maag en darmkanker was niet verhoogd. Door deze pilot uit te breiden tot de volledige kankerregistratie in het zuiden en westen van Engeland kan het onderscheidend vermogen van het onderzoek worden vergroot. Ook de bias tussen de benedenwindse en bovenwindse groepen met betrekking tot leeftijd en sociaaleconomische status kan op die manier worden geëlimineerd. Echter dit uitgebreide onderzoek is niet gepubliceerd. Bij navraag per e-mail antwoordde Preece dat de publicatie nog in bewerking is [66]. De belangrijkste ontwikkelingen zijn dat de methode om de meteorologische gegevens op te nemen aanzienlijk verbeterd is en dat de gegevens van het zuiden en het westen van Engeland inderdaad zijn toegevoegd (totaal 4,9 miljoen personen). In zijn e-mail geeft Preece aan dat uit deze verbeterde analyse geen verschillen meer komen in het risico op kanker van mond en luchtwegen of longen tussen de boven- en benedenwindse groep.

Een ander Brits onderzoek waarvan de resultaten nog niet bekend zijn, is het onderzoek van Toledano et al. [67]. Daarin wordt de mogelijke associatie onderzocht tussen gedeponeerde of geïnhaleerde geladen deeltjes benedenwinds van hoogspanningslijnen en het extra risico op huidkanker (niet-melanomen) en kankers aan de luchtwegen (in het bijzonder de mond) en longen.

Conclusie

De algemene epidemiologische onderzoeken geven geen indicatie dat er dichtbij hoogspanningslijnen extra gezondheidsrisico's optreden, met uitzondering van leukemie bij kinderen. Deze algemene onderzoeken zijn niet toegesneden op het aantonen van effecten van extra geladen fijn stof. Het aantal gepubliceerde onderzoeken waarin specifiek naar de invloed van door de wind verspreid extra geladen fijn stof op de gezondheid in de buurt van bovengrondse hoogspanningslijnen wordt gekeken is op dit moment onvoldoende om conclusies over mogelijke gezondheidseffecten te kunnen trekken.

⁵ De bruikbaarheid van het onderzoek wordt beperkt omdat Preece niet aangeeft of en hoe bij deze indeling met de variabiliteit van windsnelheid en windrichting rekening gehouden wordt.

5 Discussie en conclusies

5.1 Inleiding

Door de hoge spanning op de draden van een bovengrondse hoogspanningslijn ontstaat een elektrisch veld dat soms lokaal zo sterk is dat er doorslag in de lucht optreedt. Bij een dergelijke corona-ontlading worden ionen gevormd die hun lading gedeeltelijk aan het fijn stof in de lucht kunnen overdragen. Deze extra geladen fijnstofdeeltjes worden door de wind in de omgeving van de hoogspanningslijn verspreid. Dit literatuuronderzoek gaat over de vraag of deze extra lading afkomstig van de corona-ontladingen het risico op gezondheidseffecten van het aanwezige fijn stof voor de omwonenden vergroot. Het gaat in dit rapport niet over de algemene effecten van fijn stof op de mens, maar specifiek over de invloed van bovengrondse hoogspanningslijnen op deze effecten.

5.2 Discussie

Bovengrondse hoogspanningslijnen als mogelijke bron van fijn stof

Geen van de geëvalueerde publicaties wijst er op dat bovengrondse hoogspanningslijnen of het optreden van corona-ontladingen bij die hoogspanningslijnen fijn stof kunnen produceren. Alle onderzoeken betreffen een mogelijke beïnvloeding van het fijn stof dat al in de buurt van de hoogspanningslijn aanwezig is. Bovengrondse hoogspanningslijnen zijn zelf geen bron van fijn stof.

Corona-ontladingen en depositie van fijnstofdeeltjes

Henshaw en Fews hebben een mechanisme voorgesteld waardoor corona-ontladingen via beïnvloeding van fijn stof tot extra gezondheidseffecten zouden kunnen leiden. Dit mechanisme valt uiteen in een aantal stappen (zie Figuur 6). Voor de stappen ‘het ontstaan van corona-ontladingen’, ‘de overdracht van lading op fijnstofdeeltjes’ en de ‘verspreiding van deze extra geladen fijn stofdeeltjes door de wind’ is voldoende experimentele ondersteuning. De stap ‘oscillatie van geladen deeltjes onder een hoogspanningslijn’ is op theoretische gronden aannemelijk, maar direct experimenteel bewijs ontbreekt. Met betrekking tot de laatste stap, of extra lading op het fijn stof ook werkelijk tot extra depositie in de longen en luchtwegen of op de huid leidt, is de situatie ingewikkelder.

Luchtwegen

De extra lading die door corona-ontladingen op fijnstofdeeltjes kan worden gebracht is waarschijnlijk onvoldoende om tot extra depositie in de longen te leiden. Modelberekeningen wijzen er op dat er voor extra depositie in de longen minimaal een ladingsverhoging met ongeveer 10 elementaire ladingen nodig is. Zulke grote ladingstoevoegingen ontstaan niet door corona-ontladingen bij bovengrondse hoogspanningslijnen. Uit de wetenschappelijke onderzoeken volgt dat de gemiddelde hoeveelheid extra lading die fijnstofdeeltjes door corona-ontladingen kunnen krijgen varieert van 0,1 tot 0,9 elementaire lading. Er is één onderzoek dat voor dergelijke ladingsverhoging wel extra depositie rapporteerde [43]. In een metalen mal van de luchtwegen bleek toevoegen van één elementaire lading aan fijnstofdeeltjes met diameter rond de 0,1 μm de depositie met een factor vijf te verhogen. Dit onderzoek wordt niet ondersteund door proefdier- of vrijwilligersonderzoek. Omdat het model op essentiële punten van het (menselijk) ademhalingsstelsel verschilt, is de voorspellende waarde voor effecten op de mens twijfelachtig.

Als er veel extra lading op fijnstofdeeltjes wordt gebracht, meer dan ongeveer 10 elementaire ladingen gemiddeld per deeltje, is in menselijke vrijwilligers en proefdieren aangetoond dat de longdepositie toeneemt. Dit geldt vooral voor deeltjes van rond de 0,1 µm. Grotere deeltjes (> 0,3µm) en kleinere deeltjes (< 0,1µm) worden in de neus en bovenste luchtwegen gefilterd en bereiken de longen niet. Bij lagere ladingstoevoegingen wordt geen verhoogde depositie gemeten.

Huid

Direct onder de hoogspanningslijn gaan geladen fijnstofdeeltjes in het elektrische veld oscilleren. Dat kan op theoretische gronden tot extra depositie op de huid leiden. Metingen van deze extra depositie zijn tegenstrijdig. Few's mat extra depositie van radonvervalproducten op metalen bollen, maar andere onderzoekers vonden geen verhoogde depositie op de huid. Verder weg van de hoogspanningslijn zal een kleine extra lading op fijnstofdeeltjes (circa 1e) zeer waarschijnlijk niet tot extra depositie op de huid leiden.

Samenvattend

Op basis van de huidige kennis is niet aannemelijk gemaakt dat corona-ontladingen in de buurt van bovengrondse hoogspanningslijnen tot extra depositie van fijn stof in longen, luchtwegen of op de huid leiden. Het door Henshaw en Few's voorgestelde mechanisme, hoewel theoretisch mogelijk, wordt niet door experimentele gegevens ondersteund.

Epidemiologische ondersteuning voor gezondheidseffecten van corona-ontladingen

Het algemene epidemiologische onderzoek naar de gezondheid van mensen die in de buurt van bovengrondse hoogspanningslijn wonen, wijst alleen op een hoger risico voor leukemie bij kinderen. Een verband tussen wonen in de buurt van een hoogspanningslijn en het extra voorkomen van ziektes die met fijn stof worden geassocieerd, is niet waargenomen. Omdat dit type epidemiologisch onderzoek geen rekening houdt met de heersende windrichting zijn deze algemene onderzoeken niet optimaal om effecten van de combinatie van corona-ontladingen en fijn stof aan te tonen. Er is één onderzoek gepubliceerd waarin, achteraf, wel met de heersende windrichting rekening is gehouden; daarin werd geen verschil in leukemierisico gevonden tussen groepen kinderen die boven- of benedenwinds van een bovengrondse hoogspanningslijn wonen [64]. In niet-gepubliceerd onderzoek van Preece werd geen verhoogd risico benedenwinds gevonden [66]. Op dit moment loopt in het Verenigd Koninkrijk een omvangrijk onderzoek naar huidkanker en kanker van luchtwegen en longen benedenwinds van bovengrondse hoogspanningslijnen [Toledano, 67].

Samenvattend

Het bestaande epidemiologische onderzoek levert geen aanwijzing voor gezondheidsrisico's door extra geladen fijn stof. Het aantal gepubliceerde onderzoeken waarin specifiek naar de invloed van door de wind verspreid extra geladen fijn stof op de gezondheid in de buurt van bovengrondse hoogspanningslijnen wordt gekeken, is op dit moment echter onvoldoende om conclusies over mogelijke gezondheidseffecten te kunnen trekken.

Risicoschattingen voor gezondheidseffecten van corona-ontladingen

Ondanks de leemten in kennis (zie paragraaf 5.4) maakten NRPB en WHO de stap naar een risicoschatting⁶. Hun conclusie dat het onwaarschijnlijk lijkt dat corona-ontladingen meer dan een klein effect hebben op het langetermijngezondheidsrisico geassocieerd met fijn stof, zelfs in de meest

⁶ NRPB en WHO formuleren hun (kwalitatieve) risicoschatting als:

NRPB: However, it seems unlikely that corona ions would have more than a small effect on the long-term health risks associated with particulate air pollutants even in the individuals who are most affected

WHO: However, it seems unlikely that corona ions will have more than a small effect, if any, on long-term health risks even in the individuals who are most exposed

blootgestelde groep, geeft duidelijk aan hoe onzeker deze risicoschatting is. Ook zijn de gebruikte termen ‘onwaarschijnlijk’ en ‘meer dan een klein effect’ weinig specifiek.

Henshaw maakte ook de stap naar een meer kwantitatieve risicoschatting voor gezondheidseffecten in de buurt van hoogspanningslijnen door verhoogde blootstelling aan fijn stof [24]. Hij nam een oorzakelijk verband aan tussen corona-ontladingen en gezondheidseffecten. Daarbij ging hij uit van 30% extra depositie van (geladen) fijn stof in de longen en een toename met 30% van de kans op ziekte in een groep die benedenwinds, binnen 400 meter, van een hoogspanningslijn woont. Deze aanpak leidde voor het Verenigd Koninkrijk tot een schatting van 200 tot 400 extra gevallen van longkanker, 2000 tot 3000 gevallen van andere aan luchtverontreiniging gerelateerde ziekten en 17 extra gevallen van huidkanker. De aannames die Henshaw deed van een oorzakelijk verband tussen corona-ontladingen en gezondheidseffecten en van een 30% verhoogde ziektelast tot 400 m benedenwinds van de hoogspanningslijn zijn onbewezen en steunen niet op gevalideerde wetenschappelijke gegevens. Daarom is deze kwantitatieve risicoschatting onbetrouwbaar en onvoldoende onderbouwd.

Omvang van de blootgestelde groep

Er zijn grote verschillen in de manier waarop omwonenden van een bovengrondse hoogspanningslijn worden blootgesteld aan magnetische velden en aan fijn stof dat door corona-ontladingen extra lading heeft gekregen. Een aantal van die verschillen leiden bij corona-ontladingen vergeleken met magnetische velden tot een kleinere blootgestelde groep. Andere verschillen kunnen tot vergroting van de blootgestelde groep leiden.

Vergeleken met de blootstelling aan magnetische velden kan de groep die is blootgesteld aan extra geladen fijn stof als gevolg van corona-ionen kleiner uitvallen omdat:

- corona-ontladingen bij een hoogspanningslijn slechts gedurende een gedeelte van de tijd optreden. Magnetische velden zijn bij een hoogspanningslijn in bedrijf altijd aanwezig.
- een hoogspanningslijn is ontworpen om corona-ontladingen te voorkomen. Corona-ontladingen treden daardoor slechts langs een deel van het hoogspanningsnet op. Magnetische velden zijn onvermijdelijk en over de volle lengte van het hoogspanningsnet aanwezig;
- extra geladen fijnstofdeeltjes niet allemaal de woning binnendringen, omdat ze bijvoorbeeld in kieren worden geabsorbeerd. Het belang van een mogelijk effect is daarom binnenshuis kleiner dan in de buitenlucht. Voor magnetische velden is de afscherming door de woning verwaarloosbaar. Effecten van magnetische velden zijn binnenshuis en buitenshuis hetzelfde;
- als er effecten van lading op de depositie van fijn stof in de longen of op de huid zijn, alleen de depositie van een gedeelte van het fijn stof, rond de 0,1 μm , wordt beïnvloed.

Vergeleken met de blootstelling aan magnetische velden kan de groep die is blootgesteld aan extra geladen fijn stof als gevolg van corona-ionen groter uitvallen omdat:

- er in epidemiologisch onderzoek alleen een associatie is gevonden voor leukemie bij kinderen en niet bij volwassenen. Daarom bevat de relevante blootgestelde groep in het geval van leukemie en magnetische velden alleen de kinderen die in de buurt van een hoogspanningslijn wonen. Bij blootstelling aan extra geladen fijn stof behoren zowel kinderen als volwassenen mogelijk tot de groep die risico loopt.
- de reikwijdte van de magnetische velden beperkt is, namelijk ongeveer 100-200 meter. De groep die aan extra geladen fijn stof blootgesteld wordt, kan door invloed van de wind groter zijn. Mogelijk moet hier rekening worden gehouden met afstanden van 500 m tot, in uitzonderingsgevallen, enkele kilometers.

Kinderleukemie versus gezondheidseffecten van corona-ontladingen

Uitgebreid epidemiologisch onderzoek wijst er op dat kinderen die in de buurt van een bovengrondse hoogspanningslijn wonen meer leukemie krijgen. Tussen het onderzoek naar een mogelijk verhoogd risico op kinderleukemie in de buurt van bovengrondse hoogspanningslijnen en het onderzoek naar de gezondheidseffecten die mogelijk door corona-ontladingen kunnen ontstaan, bestaan essentiële verschillen:

- De aanwijzingen voor een verband tussen kinderleukemie en wonen bij bovengrondse hoogspanningslijnen volgen uit uitgebreid epidemiologisch onderzoek van goede kwaliteit. Gericht epidemiologisch onderzoek naar een verband tussen het wonen in de buurt van een hoogspanningslijn en een mogelijke toename van de door fijn stof veroorzaakte gezondheidseffecten ontbreekt vrijwel.
- Bij kinderleukemie wijst het epidemiologisch onderzoek op een associatie met het magnetische veld in de buurt van de hoogspanningslijn al is een oorzakelijk verband niet bewezen. Bij mogelijke effecten van fijn stof is vooral het (lokale) elektrische veld van belang.
- Voor het ontstaan van kinderleukemie door magnetische velden is geen mechanisme bekend. Voor mogelijke gezondheidseffecten van extra geladen fijn stof hebben Henshaw en Fews een mechanisme voorgesteld. Volgens dit mechanisme leiden corona-ontladingen via oplading van fijn stof en verspreiding door de wind tot extra depositie in de longen of op de huid. Echter de laatste stap in dit mechanisme - of de extra lading op het fijn stof zoals die in de buurt van een bovengrondse hoogspanningslijn kan voorkomen tot hogere depositie leidt - is niet aannemelijk gemaakt.
- Het onderzoek naar kinderleukemie loopt al meer dan 25 jaar, terwijl de eerste aanzet voor de discussie over de invloed van corona-ontladingen afkomstig van bovengrondse hoogspanningslijnen op de gezondheidseffecten van fijn stof 10 jaar geleden gegeven werd.
- Het onderzoek naar kinderleukemie is uitgevoerd in een groot aantal groepen verspreid over de Verenigde Staten, Nieuw-Zeeland, Canada, het Verenigd Koninkrijk en de Scandinavische landen. Het onderzoek naar mogelijke gezondheidseffecten van extra geladen fijn stof beperkt zich tot enkele groepen in het Verenigd Koninkrijk.

De aanwijzingen voor een mogelijke invloed van bovengrondse hoogspanningslijnen op het ontstaan van kinderleukemie zijn hierdoor sterker dan die voor mogelijke gezondheidseffecten als gevolg van door corona-ontladingen extra geladen fijn stof.

Stakeholder Advisory Group

In het Verenigd Koninkrijk geeft de *Stakeholder Advisory Group on ELF EMFs (SAGE)* in opdracht van de netbeheerder National Grid een overzicht van zienswijzen van andere beoordelende organisaties, zoals WHO, IARC, HPA en California Department of Health Services. Het Britse ministerie van Volksgezondheid steunt dit initiatief met het oog op de uitwerking van de NRPB-aanbeveling om voorzorgsmaatregelen te overwegen. Naar aanleiding van het verschijnen van het SAGE-rapport [68] zond Henshaw in mei 2007 een open brief aan de Britse minister van Volksgezondheid [69]. In deze brief pleitte hij er voor om de aandacht niet te beperken tot leukemie bij kinderen, maar ook andere effecten te evalueren zoals leukemie bij volwassenen, hersentumoren, miskramen en amyotrofe laterale sclerose. Naar Henshaw's idee is er ook voor deze andere aandoeningen voldoende bewijs om voorzorgsmaatregelen te rechtvaardigen. De mede-opstellers van het SAGE-rapport [68] delen deze visie niet. Zij vinden de bewijzen voor de corona-hypothese zwakker dan die voor de relatie tussen magnetische velden en kinderleukemie.

Henshaw en de corona-hypothese

Henshaw presenteerde de corona-hypothese aanvankelijk als alternatief voor de magnetische velden die volgens IARC mogelijk de verklaring voor een verhoogd risico op kinderleukemie is [63]. Recent heeft

Henshaw onderzocht of verstoring van de melatonine-huishouding de mogelijke oorzaak voor kinderleukemie zou kunnen zijn [70]. Dat artikel ging alleen uit van magnetische velden. Opvallend is dat de corona-hypothese niet wordt genoemd en dat een verwijzing naar Henshaw of Fewes als grondleggers van deze hypothese ontbreekt.

Meten van fijn stof

Meting van fijnstofconcentraties (PM₁₀) met het Landelijk Meetnet Luchtkwaliteit zijn belangrijk voor het fijnstofbeleid. Bovengrondse hoogspanningslijnen kunnen door corona-ontladingen de ladingsverdeling op de fijnstofdeeltjes beïnvloeden. Dit kan betekenen dat bij een hoogspanningslijn een andere PM₁₀-concentratie gemeten wordt dan zonder hoogspanningslijn, ook al is in beide gevallen de concentratie in de lucht hetzelfde. Iets soortgelijks geldt ook voor ambulante fijnstofmetingen. De vraag is hoe een veranderde ladingsverdeling de meting van PM₁₀ beïnvloedt. Onder meer de configuratie van de monitor (bijvoorbeeld inlaatverwarming), de samenstelling van het fijn stof, de omgevingstemperatuur en de luchtvochtigheid kunnen tot onder- of overschatting van de hoeveelheid fijn stof door de automatische PM₁₀-metingen leiden [71]. Door de extra oplading van fijn stof kan het aantal deeltjes dat op het filter wordt opgevangen groter of kleiner worden, wat tot een andere PM₁₀-waarde zal leiden. Het is met de huidige gegevens niet mogelijk om een schatting te maken van de grootte van deze invloed en zelfs niet of extra lading tot over- of onderschatting van de hoeveelheid fijn stof zal leiden.

5.3 Beantwoording van de onderzoeksvragen

Beïnvloedt de aanwezigheid van een bovengrondse hoogspanningslijn de concentratie van fijn stof in de buurt van de lijn?

Nee. Bovengrondse hoogspanningslijnen produceren zelf geen fijn stof.

Beïnvloedt de aanwezigheid van een bovengrondse hoogspanningslijn de lading van fijnstofdeeltjes?

Ja. Het optreden van corona-ontladingen bij bovengrondse hoogspanningslijnen is duidelijk aangetoond, al komen dergelijke ontladingen slechts gedurende een gedeelte van de tijd langs een gedeelte van het hoogspanningsnet voor. Als gevolg van deze corona-ontladingen worden ionen in de atmosfeer gebracht die hun lading gedeeltelijk aan fijnstofdeeltjes kunnen overdragen. In kwalitatieve zin is het mechanisme waardoor corona-ontladingen ontstaan goed begrepen. Over de kwantitatieve aspecten van corona-ontladingen bij bovengrondse hoogspanningslijnen, bijvoorbeeld waar en wanneer ze optreden, is minder bekend. Hoeveel lading aan het fijn stof wordt overgedragen hangt onder meer af van de deeltjesgrootte. Voor 0,1 µm deeltjes variëren de schattingen van de gemiddelde extra lading per fijnstofdeeltje van 0,1 tot 0,9 elementaire lading. Zonder aanwezigheid van een hoogspanningslijn hebben de 0,1 µm deeltjes een gemiddelde lading van 0,67 elementaire lading.

Hoe ver kunnen deze (geladen) fijnstofdeeltjes zich verplaatsen?

Corona-ontladingen kunnen leiden tot ‘wolken’ geladen deeltjes die door de wind van de hoogspanningslijnen weg worden getransporteerd. Deze wolken zijn in verschillende onderzoeken aangetoond, direct door meting van het aantal geladen deeltjes of indirect door het meten van de verandering van het natuurlijke elektrische veld. De ladingswolken worden tot op enkele honderden meters afstand benedenwinds van de hoogspanningslijnen waargenomen. In uitzonderingsgevallen is de invloed van de corona-ontladingen op het elektrische veld tot op kilometers van de hoogspanningslijn meetbaar.

Wordt depositie van fijnstofdeeltjes op de huid door de lading van de fijnstofdeeltjes beïnvloed?

De depositie op de huid wordt mogelijk beïnvloed. Theoretische overwegingen en modelberekeningen laten zien dat zeer kleine geladen deeltjes in het elektrische veld onder of dichtbij een bovengrondse hoogspanningslijn kunnen gaan oscilleren. Dit geldt vooral voor fijnstofdeeltjes met een diameter van enkele nanometers. Voor deze deeltjes wordt een hogere depositie op de huid verwacht. Dit kan leiden tot extra radioactiviteit op de huid door een verhoogde depositie van radondochters. De experimentele ondersteuning van deze hypothesen is echter niet éénduidig. Alleen Fews meet een toegenomen depositie op metalen bollen. Andere onderzoekers vinden geen extra depositie op de huid in de buurt van een bovengrondse hoogspanningslijn. Binnenshuis zal er geen effect zijn, vanwege afscherming van het elektrische veld. Of de mogelijk verhoogde depositie ook werkelijk tot gezondheidseffecten, bijvoorbeeld extra huidkanker, leidt is momenteel nog een punt van discussie.

Wordt de absorptie in de luchtwegen en longen door de lading van de fijnstofdeeltjes beïnvloed?

Als er veel extra lading op de fijnstofdeeltjes wordt gebracht, meer dan ongeveer 10 elementaire ladingen gemiddeld per deeltje, is in vrijwilligers en proefdieren aangetoond dat de longdepositie toeneemt. Bij lagere ladingstoevoegingen wordt geen verhoogde depositie gemeten. De ladingstoevoegingen door corona-ontladingen bij bovengrondse hoogspanningslijnen zijn veel kleiner. De gemiddelde extra lading per deeltje varieert van 0,1 tot 0,9 elementaire lading. Er is in één modelonderzoek (Cohen) voor dergelijke ladingsverhoging extra depositie waargenomen. Dit onderzoek vond dat de depositie van ultrafijne deeltjes met een diameter tussen 0,1 en 0,3 μm in een metalen mal van de luchtwegen werd verhoogd. Onderzoek met vrijwilligers of proefdieren om deze uitspraak te ondersteunen, ontbreekt op dit moment en de voorspellende waarde van het modelonderzoek van Cohen voor effecten op de mens is twijfelachtig. Op basis van de huidige kennis is daarom niet aannemelijk gemaakt dat corona-ontladingen in de buurt van bovengrondse hoogspanningslijnen tot verhoogde depositie in de longen kunnen leiden.

Leidt de aanwezigheid van een bovengrondse hoogspanningslijn via beïnvloeding van fijn stof tot een hoger gezondheidsrisico voor omwonenden?

Voor zover nu bekend beïnvloeden bovengrondse hoogspanningslijnen de schadelijke effecten van fijn stof niet.

5.4 Leemten in kennis

Mechanisme

Er ontbreekt kennis over een essentieel onderdeel van het mechanisme, depositie in de longen. Om aan te tonen dat extra lading op fijnstofdeeltjes met een diameter rond 0,1 μm tot extra depositie in de longen leidt, is het aan te bevelen een gericht experiment met vrijwilligers uit te voeren. De vraag is hoe de grootteverdeling en de massaverdeling (en eventueel de ladingsverdeling) van uitgedemd fijn stof verandert als er een extra lading van ongeveer 1 elementaire lading wordt toegevoegd aan fijn stof met een bekende grootte- en ladingsverdeling. Als het fijn stof in de uitgedemde lucht niet verandert door die ladingstoevoeging, lijkt extra depositie van fijn stof in de luchtwegen of de longen door deze extra lading niet aannemelijk. Worden er wel verschillen gevonden bijvoorbeeld dat er minder deeltjes met een diameter rond 0,1 μm worden uitgedemd, dan is substantiële beïnvloeding van depositie van fijn stof in de luchtwegen of de longen door deze ladingstoevoeging aannemelijk gemaakt. Dan zou ook extra depositie in de buurt van een bovengrondse hoogspanningslijn aannemelijk zijn.

Omvang van het mogelijke gezondheidsrisico van corona-ontladingen

Op dit moment zijn er geen indicaties voor gezondheidseffecten die in de buurt van bovengrondse hoogspanningslijnen door de interactie van fijn stof en corona-ontladingen zouden kunnen ontstaan. Zelfs als nieuw wetenschappelijk onderzoek aan zou tonen dat corona-ontladingen tot extra depositie van fijn stof in de longen of op de huid leiden, zijn er onvoldoende gegevens om het mogelijke extra risico in te kunnen schatten. Daarvoor is nauwkeurigere informatie nodig over:

- de grootte van het verschil in depositie in luchtwegen en longen (of op de huid) tussen een persoon die ‘dichtbij’ de hoogspanningslijn woont en een persoon die ‘voldoende veraf’ woont;
- hoe vaak en waar corona-ontladingen precies voorkomen en hoeveel lading in de atmosfeer wordt gebracht;
- tot hoe ver van de hoogspanningslijn de invloed van het extra geladen fijn stof kan reiken;
- hoe groot de blootgestelde populatie is.

Epidemiologie

Het is aan te bevelen om de epidemiologische kennis aan te vullen door gericht epidemiologisch onderzoek uit te voeren waarin de gezondheidseffecten worden vergeleken in groepen mensen die bovenwinds en benedenwinds van een hoogspanningslijn wonen. Mogelijk kan de ontbrekende kennis op dit punt op relatief korte termijn worden ingevuld als de onderzoeken van Preece en van Toledano worden gepubliceerd.

5.5 Conclusies

Het literatuuronderzoek naar de invloed van bovengrondse hoogspanningslijnen op de gezondheidseffecten van fijn stof leidt tot de volgende conclusies:

1. Bovengrondse hoogspanningslijnen produceren zelf geen fijn stof.
2. Het optreden van corona-ontladingen bij bovengrondse hoogspanningslijnen is duidelijk aangetoond. De manier waarop corona-ontladingen ontstaan is goed begrepen. Het is moeilijk kwantitatief vast te stellen hoe vaak, onder welke omstandigheden en op welke plaatsen in het Nederlandse hoogspanningsnet deze corona-ontladingen voorkomen.
3. Als er corona-ontladingen optreden, brengen die ionen in de atmosfeer die hun lading gedeeltelijk aan fijnstofdeeltjes kunnen afgeven. Vereenvoudigde berekeningen en metingen laten zien dat de gemiddelde extra lading per deeltje varieert van 0,1 tot 0,9 elementaire lading.
4. De fijnstofdeeltjes met extra lading worden met het andere fijn stof door de wind meegevoerd tot op enkele honderden meters benedenwinds van de hoogspanningslijn.
5. Voor kleine hoeveelheden extra lading op fijnstofdeeltjes zoals die in de buurt van een bovengrondse hoogspanningslijn kunnen voorkomen, is niet aannemelijk gemaakt dat ze tot extra depositie in de longen leiden. Eén modelonderzoek geeft daar wel een indicatie voor, maar deze resultaten kunnen niet zonder meer naar effecten op de mens worden vertaald.
6. Voor relatief grote hoeveelheden extra lading (meer dan ongeveer 10 elementaire ladingen) op fijnstofdeeltjes is aangetoond dat er extra depositie in de longen plaatsvindt. Corona-ontladingen bij bovengrondse hoogspanningslijnen leiden niet tot dergelijke grote hoeveelheden extra lading.
7. Als er in de buurt van een hoogspanningslijn door corona-ontladingen extra longdepositie zou optreden, zal het vooral gaan om ultrafijne deeltjes met een diameter tussen 0,1 en 0,3 μm . De depositie in de longen van grotere deeltjes (diameter boven 0,3 μm) of kleinere deeltjes (diameter onder 0,1 μm) wordt vrijwel zeker niet door corona-ontladingen beïnvloed.
8. Gericht epidemiologisch onderzoek naar de effecten van de combinatie van fijn stof en bovengrondse hoogspanningslijnen is nog niet gepubliceerd. Het onderzoek van Draper naar kinderleukemie en magnetische velden wijst niet op een verschil in risico tussen de beneden- en bovenwindse groep. Niet gepubliceerde resultaten van Preece wijzen ook niet op een effect. Een derde onderzoek (Toledano) is nog niet afgerond.
9. Direct onder een bovengrondse hoogspanningslijn is extra depositie van geladen, radioactieve fijn stofdeeltjes op de huid theoretisch mogelijk. Omdat metingen van die depositie tegenstrijdige resultaten opleveren, is verhoogde depositie en een mogelijk verhoogde kans op huidkanker niet aannemelijk gemaakt. Uit epidemiologisch onderzoek is geen verhoogd huidkankerrisico gebleken.
10. Voor zover nu bekend beïnvloeden bovengrondse hoogspanningslijnen de schadelijke effecten van fijn stof niet.

Bijlage 1 Zoekwoorden en deskundigen

Zoekwoorden

De actualisatie van de literatuur is met de binnen de RIVM-bibliotheek aanwezige zoeksystemen op de volgende manier uitgevoerd: in Pubmed, WinSpirs (Current Contents, 2004 - 7 februari 2007) en via de website scholar.google.nl is gezocht met de volgende zoektermen (apart en in combinaties): power line, aerosols, dust, charged particles, electric corona, wind, charged particles, ambient en pollutant.

Gezien hun betrokkenheid bij het onderzoek naar fijn stof en hoogspanningslijnen is in dezelfde zoeksystemen naar publicaties van de volgende auteurs gezocht: Cohen BS, Fewes AP, Grabarczyk Z, Hautanen J, Henshaw DL, Jeffers DE, Jeffers D, Mayya YS, McKinlay A, Miles JCH, Swanson J en Tammet H.

Deskundigen

Tijdens het onderzoek heeft overleg plaatsgevonden met:

- Monique Beerlage (KEMA, deskundige hoogspanningslijnen);
- Bert Brunekreef (UU/IRAS, hoogleraar milieu-epidemiologie);
- Flemming Cassée (RIVM, Centrum voor Milieu-Gezondheid Onderzoek, deskundige fijn stof);
- Marcel Janssen (Adviesbureau Petersburg, deskundige geladen deeltjes);
- Lucas Reijnders (UvA, Stichting Natuur en Milieu, hoogleraar milieukunde);
- Eric van Rongen (Gezondheidsraad, secretaris commissie Elektromagnetische Velden);
- Rudy Scholten (KEMA, deskundige hoogspanningslijnen).

Bijlage 2 Overige grijze literatuur

- Newi, G. e.a. Biologische wirkungen elektrischer, magnetischer und electromagnetischer felder. Grafenau : Expert-Verlag, 1983, ISBN: 3-88508-830-4, 1983.
Beschikbaar.
- Asanova T and Rakov A. The state of health of persons working in the electric field of outdoor 400kV and 500kV switchyards. Gig Tr Prof Zabol. 10 (5) 50-2, 1966.
Artikel in het Russisch; niet bruikbaar.
- Marino AA. Hearings on health and safety of 765kV transmission lines, New York, 1975.
Vermoedelijk gaat het hier om de volgende publicatie: Marino AA and Ray J. The Electric Wilderness. San Francisco Press, ISBN 0-911302-55-7, 1986.
Beschikbaar
- Steining, H. Hochspannung - Vorsicht Lebensgefahr. Wohnung und Gesundheit, 1985.
Niet verkrijgbaar.
- Langmayr F. Electrobiologie, In : Wohnung und Gesundheit, 1982.
Niet verkrijgbaar.
- Konig HL. Bedeutung electrischer und magnetischer felder fur den Organismus. In: Tagungsband des Oesterreichischen Instituts fur Baubiologie, 1985.
Niet verkrijgbaar.
- Mackay A. Elektrik/Elektrobiologie In: IBR Lehrwerk des Int Instituts fur Baubiologie, 1984.
Niet verkrijgbaar.
- Bianchi D, Cedrini F and Ceria E. Exposure of mammals to strong 50 Hz electric fields, In: Arch. di fisiologica 70, 1973.
Beschikbaar.
- Winters WD and Phillips JL. Enhancement of human tumour cell growth by electromagnetic and magnetic fields. Abstract. 7th Annual Meeting of the Bioelectromagnetics Society, Atlanta, July 1984.
Niet verkrijgbaar.
- Varga A. Krebs und elektromagnetischer umwelfactoren. In: Krebsgeschehen 2, 1984.
Beschikbaar.
- Marha K und Charron D. Elektromagnetisches Feld und Umwelt, 1968, 1971.
Niet verkrijgbaar.

Bijlage 3 Lijst van afkortingen

A/m	ampère per meter (eenheid van magnetische veldsterkte); 1 mA/m = 0,001 A/m
AC	alternating current (wisselstroom/spanning)
DC	direct current (gelijkstroom/spanning)
e	elementaire lading; 1 e = 1,6.10 ⁻¹⁹ C (coulomb)
HPA	Health Protection Agency (omvat voormalige NRPB)
HRTM	Human Respiratory Tract Model, ook aangeduid als ICRP-model
Hz	herz (eenheid van frequentie); 1 kHz = 1000 Hz; 1 MHz = 1 miljoen Hz; 1 GHz = 1 miljard Hz
IARC	International Agency For Research on Cancer
ICRP	International Commission on Radiological Protection
KEMA	Keuring van Elektrotechnische Materialen
LSO	Laboratorium voor Stralingsonderzoek
m	meter (eenheid van afstand); 1 mm = 0,001 m; 1 µm = 0,001 mm; 1 nm = 0,001 µm
MNP	Milieu en Natuurplanbureau
MPPD	Multiple Path Particle Dosimetry model
NRPB	National Radiological Protection Board (heet nu HPA)
NRR	Nederlandse Reanimatie Raad
PAK's	Polycyclische aromatische koolwaterstoffen
pC/m ³	Coulomb per kubieke meter (eenheid van ruimtelading); pC/m ³ = 10 ⁻¹² C/m ³
PM _x	Particulate Matter - fijn stof met een diameter kleiner dan x micrometer
Po	polonium (Po-210; Po-124; Po-218)
RIVM	Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu
SAGE	Stakeholder Advisory Group on ELF EMFs
UU/IRAS	Institute for Risk Assessment Sciences, University Utrecht
UV	ultraviolette
UvA	Universiteit van Amsterdam
V	volt (eenheid van spanning); 1 kV = 1000 V; 1 MV = 1.000.000 V
V/m	volt per meter (eenheid van elektrische veldsterkte); 1 kV/m = 1000 V/m
VROM	ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieu
WHO	World Health Organisation - Wereldgezondheidsorganisatie

Literatuur

- 1 Staatssecretaris Van Geel. Advies met betrekking tot hoogspanningslijnen. Brief aan Colleges van Burgemeester en Wethouders, Colleges van Gedeputeerde Staten, IPO, VNG, EnergieNed en Netbeheerders Elektriciteit, VROM-kenmerk SAS/2005183118, oktober 2005.
- 2 National Radiation Protection Board. Particle deposition in the vicinity of power lines and possible effects on health. Report of an independent Advisory Group on Non-ionising Radiation and its Ad Hoc Group on Corona Ions. Documents of NRPB 15 (1) 2004.
- 3 WHO, Extremely Low Frequency Fields Environmental Health Criteria Monograph No. 238, June 1, 2007. www.who.int/peh-emf/publications/elf_ehc/en/index.html, geraadpleegd 1 augustus 2007.
- 4 Gezondheidsraad. Deeltjesvormige luchtverontreiniging. Den Haag: Gezondheidsraad, 30 oktober 1995; 1995/14.
- 5 Gezondheidsraad. Elektromagnetische velden: Jaarbericht 2001. Den Haag: Gezondheidsraad, 29 mei 2001, 2001/14.
- 6 Actiecomité Maarssen, website: www.hoogspanningmaarssen.nl/, geraadpleegd 1 augustus 2007.
- 7 Buijsman E, Beck JP, Bree L van, Cassee FR, Koelemeijer RBA, Matthijsen J, Thomas R, Wieringa K Fijn stof nader bekeken. De stand van zaken in het dossier fijn stof. Milieu- en Natuurplanbureau (in samenwerking met de sector Milieu en Veiligheid van het RIVM). Rapport 500037008, ISBN 90-6960-124-9, MNP 2005.
- 8 WHO, Systematic review of health aspects of air pollution in Europe Factsheet EURO/04/05. Zie: www.euro.who.int/air/activities/20050512_1, Genève, 2004, geraadpleegd 1 augustus 2007.
- 9 EU Richtlijn 96/62/GC van de raad van 27 september 1996 inzake de beoordeling en het beheer van de luchtkwaliteit. Publicatieblad van de Europese Gemeenschappen, No L 296/55, 1996.
- 10 Illustratie van het ademhalingsstelsel afkomstig van de website www.reanimatie.nl/ademhaling.html, geraadpleegd 1 augustus 2007. Deze website wordt verzorgd door de Nederlandse Reanimatie Raad, een samenwerkingsverband van de Nederlandse Hartstichting, het Nederlandse Rode Kruis, Het Oranje Kruis en de Vereniging van Artsen.
- 11 ICRP. Human respiratory tract model for radiological protection. ICRP publication 66, Ann ICRP, 24 (1-3), 1996.
- 12 Winter-Sorkina R de, Cassee FR From concentration to dose: factors influencing airborne particulate matter deposition in humans and rats RIVM rapport 650010031, RIVM Bilthoven, The Netherlands, 2002.
- 13 Nemmar A, Hoet PHM, and Nemery B. Translocation of Ultrafine Particles. Environ Health Perspect, 114 (4) A211, 2006.
- 14 Geiser M, Rothen-Rutishauser B, Kapp N, Schürch S, Kreyling W, Schulz H, et al. Ultrafine particles cross cellular membranes by nonphagocytic mechanisms in lungs and in cultured cells. Environ Health Perspect 113 (11) 1555–1560, 2005.
- 15 Andersson KG, Fogh CL, Byrne MA, Roed J, Goddard AJH and Hotchkiss SAM. Radiation dose implications of airborne contaminant deposition to humans. Health Physics 82 (2) 226-232, 2002.
- 16 Brand RM and Mueller C. Transdermal penetration of atrazine, alachlor, and trifluralin: effect of formulation. Toxicological Sciences 68 (1) 18-23, 2002.
- 17 Eatough JP and Henshaw DL. Radon Dose to the Skin and the Possible Induction of Skin Cancers. Radiat Prot Dosimetry 39 (1/3) 33-37, 1991.
- 18 Harley NM, Kolber AB, Shore RE, Albert RE Altman SE and Pasternack B. The skin dose and response for the head and neck in patients irradiated with X-ray for Tinea Capitis: implications for environmental radioactivity. In: Epidemiology Related to Health Physics, Proceedings of 16th mid year topical meeting of the Health Physics Society. CONF-83011 (Springfield VA: National Technical Information Service) pp 125-136, 1983.
- 19 Chalmers JA. Negative electric fields in mist and fog. J. Atmos Terrestr Phys, 1952, vol 2, 155-159.
- 20 Hendrickson RC. Space charge drift from a +/- 400-kV direct current transmission line. Bioelectromagnetics 7(4) 369-79, 1986.

- 21 Fews AP, Henshaw DL, Wilding RJ and Keitch PA. Corona ions from powerlines and increased exposure to pollutant aerosols. *Int J Radiat Biol.* 75(12) 1523-1531, 1999.
- 22 Goldman, M, Golman A and Sigmond RS. The corona discharge, its properties and specific uses. *Pure & Appl. Chem.* 57 (9) 1353-1362, 1985.
- 23 Cross, JA. *Electrostatics, Principles, Problems and Applications.* Bristol IOP Publishing Ltd., 1987.
- 24 Henshaw DL. Does our electricity distribution system pose a serious risk to public health? *Med. Hypotheses.* 59(1) 39-51, 2002.
- 25 Aggarwal RK, Johns AT, Jayasinghe JASB and Su W. Overview of the condition monitoring of overhead lines, *Electric Power Systems Research* 53(1) 15-22, 2000.
- 26 Swanson J and Jeffers D. Presentation to the Ad Hoc working group of NRPB, January 10, 2002.
- 27 Bracken TD, Senior RS and Bailey WH. DC Electric Fields From Corona-Generated Space Charge Near AC Transmission Lines. *IEEE Trans on Power Delivery* 20 (2) 1692- 1702, 2005.
- 28 Fews AP and Henshaw DL. Letter to the editor: Reply to Comment on the papers: Increased exposure to pollutant aerosols under high voltage power lines; and Corona ions from powerlines and increased exposure to pollutant aerosols. *Int J Radiat Biol.* 76 (12) 1688-1699, 2000.
- 29 Fews AP, Wilding RJ, Keitch PA, Holden NK and Henshaw DL. Modification of atmospheric DC fields by space charge from high-voltage power lines. *Atmospheric Research* 63, 271-289, 2002.
- 30 Reischl GP, Mäkelä JM, Karch R and Necid J. Bipolar charging of ultrafine particles in the size range below 10 nm. *J. Aerosol Sci.* 27 (6) 931-949, 1996.
- 31 Nagat K and Ogawa T. Evolution of tropospheric ions observed by an ion mobility spectrometer with a drift tube. *J. Geophys. Res.* 103 (D12) 12917-13925, 1998.
- 32 Hoppel WA and Frick GM. Ion-aerosol attachment coefficients and the steady state charge distribution on aerosols in a bipolar environment. *Aerosol Sci. Technol.* 5, 1-21, 1986.
- 33 Henshaw DL and Fews AP. Presentation to the Ad Hoc working group of NRPB, December 3, 2001.
- 34 Jeffers DA. A Note on the Charging of Aerosols by Overhead Line Corona. *Radiat Prot Dosimetry* 95 (2) 181-183, 2001.
- 35 Jeffers D. Modeling and analyses do not support the hypothesis that charging by power-line corona increases lung deposition of airborne particles. *Radiat Prot Dosimetry* 123 (2) 257-261, 2007.
- 36 Henshaw DL, Ross AN, Fews AP and Preece W. Enhanced deposition of radon daughter nuclei in the vicinity of power frequency electromagnetic fields. *Int J. Radiat Biol.* 69 (1) 25-38, 1996.
- 37 Porstendörfer J. Properties and behaviour of radon and thoron and their decay products in the air. *J. Aerosol Sci.* 25, 219-263, 1994.
- 38 Mühleisen R. Die Luftelektrischen Elemente in Grossstadtbereich. *Z. Geophys.* 29, 142-160, 1953.
- 39 Mühleisen R. Disturbance through dispersed high voltage powerlines. *J. Atmos. Terrest. Phys.* 10, 485-494, 1953.
- 40 Jones CD and Hutchinson WCA. Plumes of electric space charge in the lower atmosphere. *J. Atmos. Terrstr. Phys.* 38, 485-194, 1976.
- 41 Swanson J and Jeffers D. Possible mechanisms by which electric fields from power lines might affect airborne particles harmful to health. *J. Radiol. Protect* 19 (3) 213-229, 1999.
- 42 Grabarczyk Z and Berlinski J. Charging of atmosphere aerosols by AC HV powerlines. *Electrostatics* 63, 755-759, 2005.
- 43 Cohen BS, Xiong JQ and Li W. The influence of charge on the deposition behavior of aerosol particles with emphasis on singly charged nanometer particles. In: *Aerosol inhalation: recent research frontiers. Proceedings of the international workshop on aerosol inhalation, lung transport, deposition and the relation to the environment: recent research frontiers, Warsaw, Poland, September 14-16, 1995, Marijnissen JCM and Gradon L, Dordrecht, Kluwer, ISBN: 0792340582, 1996.*
- 44 Fry FA. Charge distribution on polystyrene aerosols and deposition in the human nose. *Aerosol Sci.* 1, 135-146, 1970.
- 45 Melandri C, Prodi V, Tarroni G, Formignani M, De Zaiacomo T, Bompane GF and Maestri G. On the deposition of unipolarly charged particles in the human respiratory tract. In: *Inhaled Particles IV (Edited by Waalton WH), Pergamon Press Oxford, 193-201, 1977.*
- 46 Melandri C, Tarroni G, Prodi V, Zalacomo T, Formignani M and Lombardi CC. Deposition of charged particles in the human airways. *J. Aerosol Sci.* 14, 657-670, 1983.

- 47 Prodi V and Mularoni A. Electrostatic lung deposition experiments with humans and animals. *Ann. Occup. Hyg.* 29 (2) 229-40, 1985.
- 48 Yu CP. Theories of electrostatic lung deposition of inhaled aerosols. *Ann. Occup. Hyg.* 29 (2) 219-228, 1985.
- 49 Bailey AG, Hashish AH and Williams TJ. Drug delivery by inhalation of charged particles. *J Electrostatics* 44, 3-10, 1998.
- 50 Chan TL, Lippmann M, Cohen VR and Schlesinger RB. Effect of electrostatic charges on particle deposition in a hollow cast of human larynx-tracheobronchial tree. *J. Aerosol Sci* 9, 463-468, 1978.
- 51 Cohen BS, Xiong JQ, Asgharian B and Ayres L. Deposition of inhaled charged ultrafine particles in a simple tracheal model. *J. Aerosol Sci.* 26, 1149-1160, 1995.
- 52 Cohen BS, Xiong JQ, Fang CP and Li W. Deposition of Charged Particles on Lung Airways. *Health Physics* 74(5) 554-560, 1998.
- 53 Keitch PA, Fews AP and Henshaw DL. The effect of electric charge on deposition of environmental aerosols in a mechanical model lung. *International Scientific Conference on Childhood Leukaemia: the incidence, causal mechanisms and possible methods of prevention, Westminster, London, 6 - 10 September 2004.*
- 54 Keitch PA. Reply to an e-mail sent by Gert Kelfkens. Subject of the reply: 'power lines and deposition of aerosols', July 19, 2007.
- 55 Stather JW, Bailey MR, Birchall A and Miles JC. Comment on the paper: Enhanced deposition of radon daughter nuclei in the vicinity of power frequency electromagnetic. *Int J Radiat Biol.* 69 (5) 645-649, 1996.
- 56 Fews AP, Henshaw DL, Keitch PA, Close JJ and Wilding RJ. Increased exposure to pollutant aerosols under high voltage power lines. *Int J Radiat Biol.* 75 (12) 1505-1521, 1999.
- 57 McLaughlin JP and Gath G. Radon Progeny Activities in the Vicinity of High Voltage Power Lines. *Radiat Prot Dosimetry* 82 (4) 257-262, 1999.
- 58 Miles JCH and Algar RA. Measurement of radon decay product concentration under power lines *Radiat Prot Dosimetry* 74 (3) 193-194, 1997.
- 59 Henshaw DL, Ross AN, Fews AP and Preece W. Authors reply to letter to the editor. *Int J Radiat Biol.* 69 (5) 653-657, 1996.
- 60 Swanson J and Jeffers D. Comment on the papers: Increased exposure to pollutant aerosols under high voltage power lines; and Corona ions from powerlines and increased exposure to pollutant aerosols. *Int J Radiat Biol.* 76, 1685-1688, 2000.
- 61 Jeffers DE. AC electric fields and particle deposition on a sphere. *Radiat Prot Dosimetry* 118 (1) 56-60, 2006.
- 62 Miles JCH. *Factors Affecting Skin Doses Due to Radon Daughters*, UK National Radiation Protection Board (NRPB-197), ISBN 0-85951-272-X, 1986.
- 63 IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans *Static and Extremely Low-Frequency Electric and Magnetic Fields*. Vol. 80, 2001.
- 64 Draper G, Vincent T, Kroll ME and Swanson J. Childhood cancer in relation to distance from high voltage power lines in England and Wales: a case-control study. *Brit Med J.* 330 (7503)1290, 2005.
- 65 Preece A, Wright MG, Iwi GR, Dunn E and Etherington DJ. Cancer and high voltage power lines with respect to wind direction. *BEMS abstract book, 23rd annual meeting BEMS, St. Paul MN, USA, June 10-14, 2001.*
- 66 Preece Alan W. Reply to an e-mail sent by Gert Kelfkens. Subject of the reply: 'power lines, wind, aerosols and health effects'. March 26, 2007.
- 67 Toledano MB, Briggs D, Swanson J, Shaddick G, Keshishian C, De Hoogh K, Elliott P. Adult cancers near overhead power lines. Abstract of oral presentation at the 8 th International Congress of the European BioElectromagnetics Association (EBEA), Bordeaux, France, 10 - 13 April 2007. beba.adera.fr/upload/abstract-new-19.03.2007/120/120-POWERLINES_25102006.doc, geraadpleegd op 3 augustus 2007.

- 68 Stakeholder Advisory Group on ELF EMFs (SAGE). First Interim Assessment: Power Lines and Property, Wiring in Homes, and Electrical Equipment in Homes. R K Partnership Ltd, April 27, 2007. www.emfs.info/documents/SAGE_first_interim_assessment.pdf, geraadpleegd 3 augustus 2007.
- 69 Henshaw DL. Open letter to Caroline Flint MP, Minister for Public Health on 'First Interim Report of the Stakeholder Advisory Group for ELF EMF (SAGE)', May 8, 2007. www.electric-fields.bris.ac.uk/Sageletter.pdf, geraadpleegd op 3 augustus 2007.
- 70 Henshaw DL, Reiter RJ. Do magnetic fields cause increased risk of childhood leukemia via melatonin disruption? Bioelectromagnetics, Suppl 7:S86-97, 2005.
- 71 Beijk R, Hoogerbrugge R, Hafkenscheid TL, Van Arkel FTh, Stefess GC, Van der Meulen A, Wesseling JP, Sauter FJ en Albers RAW. PM₁₀: Validatie en equivalentie 2006. RIVM rapport 680708001, 2007.